



---

# **DIPLOMARBEIT**

---

Herr  
**Christian Sommerschuh**

## **3D-TV Systeme Die Verwendung der Integral Fotografie in 3D-TV Systemen**

2010



# **DIPLOMARBEIT**

---

## **3D-TV Systeme Die Verwendung der Integral Fotografie in 3D-TV Systemen**

Autor:

**Christian Sommerschuh**

Studiengang:

Multimediatechnik

Seminargruppe:

MK06w1

Erstprüfer:

Prof. Dr.-Ing. Rainer Zschockelt

Zweitprüfer:

Dipl.-Medienkünstler Bernhard Schipper

Mittweida, November 2010



---

## **Bibliografische Angaben**

Sommerschuh, Christian: 3D-TV Systeme, 71 Seiten, 41 Abbildungen, Hochschule Mittweida (FH), Fakultät Elektro- und Informationstechnik

Diplomarbeit, 2010

Satz:  $\text{\LaTeX}$

## **Referat**

Diese Diplomarbeit widmet sich eingehend der Stereoskopie. Anhand der theoretischen Einführung soll das Thema Stereoskopie zunächst genauer erörtert werden. Es wird dabei auch geklärt, wie das räumliche Sehen physiologisch überhaupt erst möglich wird. Nachdem verschiedene Methoden zur Aufnahme und Wiedergabe von stereoskopischen Inhalten erläutert werden, wird explizit auf das Thema 3D-TV Systeme eingegangen. Es wird erörtert, welche Anforderungen an die Aufnahme, Signalerzeugung, Codierung und Übertragung von dreidimensionalen Inhalten gestellt werden. Mit der Methode der Integral Fotografie wird gezeigt, dass auch ohne den Gebrauch von 3D-Brillen stereoskopische Bilder erzeugt werden können. Es werden technische Probleme näher erläutert und Lösungsansätze beschrieben.



# I. Inhaltsverzeichnis

<b>Inhaltsverzeichnis</b>	<b>I</b>
<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>II</b>
<b>Vorwort</b>	<b>III</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1 Motivation . . . . .	1
1.2 These der Diplomarbeit . . . . .	1
1.3 Ausgangslage . . . . .	2
1.4 Abgrenzung . . . . .	2
1.5 Überblick über die These . . . . .	3
<b>2 Grundlagen</b>	<b>5</b>
2.1 Menschliche Wahrnehmung . . . . .	5
2.2 Optische Wahrnehmung . . . . .	5
2.2.1 Monokulare Tiefenwahrnehmung . . . . .	7
2.2.2 Binokulare Tiefenwahrnehmung . . . . .	12
2.3 Geschichte der Stereoskopie . . . . .	14
<b>3 3D-TV Systeme</b>	<b>21</b>
3.1 Voraussetzungen und Bedingungen . . . . .	21
3.2 Methoden . . . . .	23
3.2.1 Siebverfahren . . . . .	24
3.2.2 Spreizverfahren . . . . .	28
3.3 Grundtechniken . . . . .	29
3.3.1 Synchronisierung . . . . .	30
3.3.2 Aufnahme . . . . .	31
3.4 Übertragung . . . . .	32
<b>4 Integral Fotografie in 3D-TV Systemen</b>	<b>35</b>
4.1 Einleitung . . . . .	35
4.2 Funktionsweise . . . . .	36
4.3 Geschichte . . . . .	39
4.4 Probleme und deren Behebung . . . . .	45
4.4.1 Pseudoskopische Bilder . . . . .	46
4.4.2 Optische Überschneidungen einzelner Bildelemente (cross-talk) . . . . .	48
4.4.3 Eingeschränkte Auflösung . . . . .	49
4.4.4 Aufnahme und Wiedergabe in Echtzeit . . . . .	54
<b>5 Fazit</b>	<b>59</b>
<b>6 Literaturverzeichnis</b>	<b>63</b>





## II. Abbildungsverzeichnis

Abb. 1:	Anatomie des Auges . . . . .	6
Abb. 2:	Perspektivische Verkürzung . . . . .	8
Abb. 3:	Luftperspektive . . . . .	9
Abb. 4:	Überdeckung von Gegenständen . . . . .	10
Abb. 5:	Schattenplastik . . . . .	11
Abb. 6:	Querdisparation . . . . .	12
Abb. 7:	Wheatstonesche Stereoskop . . . . .	15
Abb. 8:	Random-Dot Stereogramm . . . . .	16
Abb. 9:	Kaiserpanorama . . . . .	18
Abb. 10:	Polarisationsverfahren . . . . .	26
Abb. 11:	Wellenlängenmultiplextechnik . . . . .	27
Abb. 12:	Rasterverfahren . . . . .	29
Abb. 13:	Prinzip Side-by-Side . . . . .	31
Abb. 14:	Prinzip Spiegel-Rig . . . . .	32
Abb. 15:	Prinzip der Übertragung . . . . .	34
Abb. 16:	Schema der Integralen Fotografie . . . . .	36
Abb. 17:	Facettenauge-Linsenplatte . . . . .	37
Abb. 18:	Integralbild . . . . .	37
Abb. 19:	Abtastungseffekt . . . . .	38
Abb. 20:	Beispielleffekt der Facettenaugenlinse . . . . .	39
Abb. 21:	Professor Gabriel M. Lippmann . . . . .	40
Abb. 22:	Simulation durch Röhrenbildschirm . . . . .	43
Abb. 23:	Integram Methode . . . . .	43
Abb. 24:	Integram-Fotografie . . . . .	44
Abb. 25:	Umkehrung des pseudoskopischen Bildes . . . . .	45
Abb. 26:	Funktionsweise der Integral Fotografie . . . . .	46
Abb. 27:	Methode nach Herbert E. Ives . . . . .	46
Abb. 28:	Orthoskopisch reproduziertes Bild . . . . .	47

Abb. 29:	Orthoskopisch-pseudoskopische Konvertierung . . . . .	47
Abb. 30:	Optisches Übersprechen (cross talk) . . . . .	48
Abb. 31:	Darstellung einer GRIN-Linse . . . . .	49
Abb. 32:	Ablaufdiagramm bei der Aufnahme und Wiedergabe . . . . .	50
Abb. 33:	Beispiel für die Auflösung eines reproduzierten Einzelbildes . . . . .	51
Abb. 34:	Beispiel für die Bildwiedergabe . . . . .	52
Abb. 35:	Aliasing-Effekt bei der Abtastung . . . . .	52
Abb. 36:	Auflösungsverlust . . . . .	53
Abb. 37:	Auflösungsverlust . . . . .	53
Abb. 38:	Linse zur Tiefenkontrolle . . . . .	54
Abb. 39:	Experiment mit Echtzeitaufnahme . . . . .	55
Abb. 40:	Aufgenommene Szene und vergrößerte Ansicht . . . . .	56
Abb. 41:	Reproduziertes Bild . . . . .	56

---

# Danksagung

Im Rahmen der vorliegenden Diplomarbeit möchte ich Herrn Prof. Dr.-Ing. Rainer Zschockelt als meinen studentischen Erstbetreuer und Herrn Dipl.-Medienkünstler Bernhard Schipper als meinen Betreuer hervorheben. Ein herzliches Dankeschön geht auch an Prof. Dr. Klaus Dohmen aus der Fachgruppe Mathematik der Hochschule Mittweida. Durch seine, frei zur Verfügung gestellte, Latex-Vorlage konnte die Arbeit korrekt formatiert werden. Bei Fragen und Problemen mit Latex gab er mir sehr schnell Rat und kompetente Antworten.

Mein Dank geht auch an die Deutsche Nationalbibliothek, die mir neben der gesamten Literatur auch einen ruhigen Platz und guten Kaffee zur Verfügung stellte.

Ich danke meinen Eltern für ihr Vertrauen in mein Können und die stetige Unterstützung während meines Studium. F.U. & Renate danke ich für die wöchentlichen Anrufe zur Erkundigung des Standes der Arbeit, zum Korrekturlesen und vor allem ihren Interesse am Thema der Diplomarbeit. Nicht fehlen darf natürlich der Dank an meine Freundin Julia Rittig für ihre Unterstützung, sei es als Kontrollleserin und als mentale Stütze während dieser Zeit.



### III. Vorwort

Alle Gegenstände und Erscheinungen in unserer Umgebung erscheinen uns dreidimensional. Sie haben also eine räumliche Form. Die klassische Fotografie und damit verbunden die Kinematographie bzw. der Film sind aber nicht imstande, Körper und Naturerscheinungen in allen drei Dimensionen darzustellen, es kommt vielmehr zu einer Darstellung eines Gegenstandes in nur zwei seiner Dimensionen.<sup>1</sup> Um sie aber in allen drei Dimensionen wiederzugeben, bedarf es der Stereoskopie.

Das Wort „Stereoskopie“ besteht aus zwei Wortteilen. Beide Teile sind aus dem griechischen entnommen. Stereo bedeutet „Volumen, Körperlichkeit“ und „skopie“ von „skopein“ „sehen, beobachten“. Mit dem Doppelwort Stereoskopie, wofür auch gelegentlich nur die Abkürzung „Stereo“ benutzt wird, wird die künstliche bildliche Wiedergabe von Gegenständen in drei Dimensionen bezeichnet.

Es hat gut 100 Jahre gedauert, bis sich die Stereoskopie durchgesetzt hat. Der Grund, warum sich Stereoskopie jetzt durchzusetzen vermag, liegt hauptsächlich in der banalen Wahrheit, dass die Technik von heute dem Anspruch hochqualitativer Stereoskopie genügt. Die gesamte Produktionskette des analogen Filmes, von der Filmaufnahme bis zur fertigen Kinokopie, war sowohl mechanischen als auch chemischen Prozessen unterworfen. Erst die digitale Produktionstechnik erlaubt die notwendige Synchronität des Bildabstandes zwischen rechtem und linkem Bild von Aufnahme bis Ausgabe. Ebenfalls erhält die Stereoskopie auch langsam Einzug in die Wohnzimmer; erste 3D-Fernsehgeräte von Sony, Samsung und Panasonic sind bereits im Handel erhältlich.

Neben den vielen unterschiedlichen Methoden zur Aufnahme und Wiedergabe von dreidimensionalen Filmen, sind noch lange nicht alle technischen Fragen rund um 3D geklärt. Neben allen derzeit verwendeten Projektionslösungen, die jeweils eine Spezialbrille erforderlich machen, ist das Sehen ohne Brille durch den Einsatz von autostereoskopischen Displays möglich. Genau dieser Verzicht von Hilfsmitteln sollte das Ziel sein.

---

<sup>1</sup> Vgl. Ivanov 1954, S. 3



# 1 Einleitung

## 1.1 Motivation

Eine derzeitige Renaissance erlebt, wieder einmal, das 3D-Kino<sup>2</sup>. Die Kinobranche setzt auf die 3. Dimension und hofft durch den Einsatz von stereoskopischen Bildern mehr Besucher in die Kinos zu locken und, damit verbunden, auch mehr Geld in die leeren Kinokassen zu spülen. Doch wird in die Zeitgeschichte zurück geschaut, ist schnell erkennbar, dass es diese Versuche schon häufiger gab. Bis jetzt konnten sie sich aber noch nicht richtig durchsetzen.

Nicht nur das Kino setzt auf die Stereoskopie, wie das räumliche Sehen genannt wird, auch andere Bereiche hoffen durch die Verwendung von 3D-Bildern auf einen erheblichen Aufschwung. Die dreidimensionale Bildverarbeitung und verschiedene Bildschirmsysteme sind derzeit die wichtigsten Anwendungen im Bereich der Informationstechnik. Sei es als Computerbildschirm, Fernsehen, Video, Robotik, Messtechnik, die militärische Aufklärung oder die Medizin. Die Entwicklung zur Darstellung von hochwertigen 3D-Inhalten, besonders der Bewegungen, ist ein sehr anspruchsvolles und schwieriges Problem. Versuche zur Herstellung von stereoskopischen Effekten gab es schon in der Malerei und wurden somit schon vor der Erfindung der Fotografie unternommen. Ideale 3D-Bilder sind und bleiben aber weiterhin Ziele der Technologie unserer Zukunft und dies nicht nur aufgrund ihrer vielfältigen und bedeutsamen Verwendung.

## 1.2 These der Diplomarbeit

Aufgrund unserer biologischen Beschaffenheit, dem Besitz zweier Sehorgane (Augen) und dem Sehzentrum im menschlichen Gehirn, ist es uns möglich, Bilder räumlich wahrzunehmen. Doch werden diese Bilder auf einem Bildschirm, also auf einer ebenen Fläche, abgebildet, verschwindet der räumliche Eindruck, die Tiefenwirkung geht verloren und das Bild wirkt platt. In den letzten Jahren wurde weitestgehend im Bereich des stereoskopischen Sehens geforscht und wöchentlich erscheint ein neuer Kinofilm, der in 3D „gedreht“ wurde.

Genauso groß wie die Anzahl der Filme ist auch die Anzahl der Wiedergabetechniken. Doch eins haben sie alle noch gemeinsam; man ist auf den Gebrauch einer Brille als Hilfsmittel zur Erzeugung der Tiefenwirkung angewiesen. Es ist deshalb nur noch eine Frage der Zeit, bis so genannte autostereoskopische Displays, die ein räumliches Sehen ohne Hilfsmittel ermöglichen, auf dem Markt angeboten werden. Hierbei muss aber

<sup>2</sup> Die Bezeichnung 3D wird auch oft im Zusammenhang mit computergenerierten Animationsfilmen benutzt. Im Folgenden steht die Bezeichnung 3D für stereoskopische, dreidimensionale Darstellung.

wieder zwischen der Benutzung durch einen einzelnen Betrachter und der Betrachtung durch mehrere Personen unterschieden werden. Ändert man seine Position bzw. betrachtet eine andere Person das wiedergegebene Bild aus einer anderen Perspektive, ist das abgebildete Bild immer noch das Selbige. Der räumliche Seheindruck entsteht aber erst, wenn es dem Betrachter möglich ist, Objekte von der Seite bzw. verdeckte Objekte zu sehen.

### 1.3 Ausgangslage

Ein Verfahren, welches aufgrund seiner Komplexität und seiner Schwierigkeiten in der Herstellung bis jetzt noch nicht massentauglich ist, ist die Integral Fotografie<sup>3</sup>. Bereits 1908 von G. Lippmann, einem französischen Physiker, der sich vor allem mit der Farb fotografie beschäftigte, als Patent angemeldet, ist es bis heute noch nicht gelungen, ein kommerzielles Massenprodukt mit dieser Methode auf den Markt zu bringen. Heutzutage könnten aber moderne 3D-Grafik-Rechner mit der Menge der anfallenden Daten, die bei der Herstellung von Bildern für die Integral Fotografie entstehen, umgehen. Auch die Softwareentwicklung hat einen großen Schritt getan und so gibt es erste Programme, die die für die Optik notwendigen Simulationsprogramme abarbeiten können. Auch Produktionstechniken, z.B. für die Herstellung von Linsenplatten, haben sich in den letzten Jahren deutlich verbessert und könnten somit den Weg der Integral Fotografie in die Welt der 3D-TV<sup>4</sup> Systeme eröffnen.

### 1.4 Abgrenzung

Die Diplomarbeit soll die Grundlagen der Stereoskopie sowie der Integral Fotografie erklären. Es werden Probleme aufgezeigt, weshalb es bei dieser Methode noch zu keiner kommerziellen Entwicklung gekommen ist. Hierbei wird vor allem auf vier technische Probleme eingegangen: a) mit der direkten Methode erscheint ein pseudoskopisches Bild; b) eine optische Überschneidung der einzelnen Bildelemente; c) Gegenstände, die sich bei der Reproduzierung weiter weg befinden, haben eine andere Auflösung als Objekte, die sich unmittelbar, unter den gleichen Bedingungen, vor oder hinter der Linseneinheit befinden; und d) die Schwierigkeit zur Realisierung der Aufnahme und Wiedergabe in Echtzeit.

<sup>3</sup> Im Folgenden wird ‚Fotografie‘ konsequent mit ‚f‘ geschrieben (außer ggf. in Zitaten und bei fremdsprachigen Quellen). Alle anderen ‚Graphien‘ werden hingegen mit ‚ph‘ geschrieben.

<sup>4</sup> 3D-TV ist die Abkürzung für 3D-Television und damit für eine Fernsehübertragung von Videosignalen getrennt für das linke und rechte Auge, so dass der Eindruck von räumlicher Tiefe entsteht.



## 1.5 Überblick über die These

Nachdem mit Kapitel 1 die Einleitung der Diplomarbeit geschaffen wurde, beschäftigt sich Kapitel 2 mit den Grundlagen der Stereoskopie. Dieser theoretische Teil ist ein wichtiges Kapitel der Arbeit. Anhand der theoretischen Einführung wird das Thema Stereoskopie zunächst genauer erörtert und es wird geklärt, wie räumliches Sehen physiologisch überhaupt möglich ist. Um aber von der Stereoskopie Gebrauch zu machen, müssen auch einige Grundregeln und Gesichtspunkte beachtet werden. Mit einem Überblick über die Geschichte und die Entwicklung der Stereoskopie schließt das Kapitel ab. Kapitel 3 stellt Methoden zur Aufnahme und Wiedergabe von stereoskopischen Filmen dar. Hier wird schon explizit auf das Thema 3D-TV Systeme eingegangen. Es wird erörtert, welche Anforderungen an die Aufnahme, an die Codierung und Signalerzeugung und an die Übertragung von dreidimensionalen Inhalten gestellt werden. Das Hauptaugenmerk der Arbeit liegt jedoch im 4. Kapitel. In diesem Kapitel wird zuerst die Entdeckung und die Funktion der Integral Fotografie beschrieben. Die bereits genannten technischen Probleme bei der Umsetzung von dreidimensionalen Inhalten für die Integral Fotografie werden noch einmal genauer erläutert. Ebenfalls werden Lösungsansätze zur Behebung derselben beschrieben. Mit einem Fazit, das vor allem die Nutzung der Integral Fotografie in 3D-TV Systemen betrachtet, schließt die vorliegende Arbeit ab.



## 2 Grundlagen

### 2.1 Menschliche Wahrnehmung

Der Mensch sammelt permanent bewusst und unbewusst eine große Anzahl an Informationen aus seiner Umwelt. Obwohl unser Gehirn eine sehr hohe Leistungsfähigkeit besitzt, müssen diese eingehenden Informationen sortiert, verarbeitet und auch ignoriert werden. Es ist unmöglich, alle Signale gleichzeitig aufzubereiten und zu bewerten. Hier wird einfach nach ihrer Wichtigkeit sortiert und Informationen, die auf eine Gefahr hinweisen, unseren Erwartungen widersprechen oder neu sind, werden priorisiert und können durch Aufmerksamkeit noch gezielt gesteigert werden.<sup>5</sup>

Die menschliche Wahrnehmung bezieht sich hierbei insbesondere auf die „fünf Sinne“ Fühlen, Hören, Riechen, Schmecken und Sehen. Insgesamt besitzt der Mensch auch fünf Sinnesorgane. Ihre biologische Hauptaufgabe ist es, dem Menschen den lebenswichtigen Kontakt mit seiner Außenwelt zu ermöglichen.<sup>6</sup> Unterschieden wird dabei zwischen mittelbaren und unmittelbaren Sinneseindrücken. Zu den unmittelbaren gehört zum Beispiel der Druck beim Ergreifen eines Gegenstandes oder ein kalter Windstoß. Andere Reize wirken dagegen auch über eine gewisse Entfernung hinweg. Beim Menschen werden diese besonderen Sinneseindrücke über die Sinnesorgane Ohren und Augen wahrgenommen.<sup>7</sup> Diese beiden Organe sind jeweils von absolut gleicher anatomischer Beschaffenheit und in symmetrischer Anordnung auch doppelt vorhanden.

Beim Hören lässt sich infolge der Interferenzerscheinungen, also des zeitlich nacheinander erfolgenden Eintreffens der Schallwellen auf beiden Trommelfellen, die Schallrichtung durch kleine seitliche Phasenverschiebungen erkennen.<sup>8</sup> Mit den beiden Augen ist es dem Menschen möglich räumlich zu sehen. Er kann über diesen Sinneseindruck erkennen wie hoch ein Baum ist oder wie weit entfernt ein Haus steht.

### 2.2 Optische Wahrnehmung

In der optischen Wahrnehmung wird, wie bei jedem anderen der fünf Sinne, eine Art Vorfilterung vorgenommen, da der Sehnerv nur etwa eine Million Informationen weiterleiten kann. Das Bild, das wir gerade sehen, wird seitenverkehrt und auf dem Kopf stehend auf der Netzhaut abgebildet. Die Netzhaut bietet über 130 Millionen Photorezeptoren Platz. Diese Rezeptoren sind in Stäbchen und Zäpfchen unterteilt, wobei die Zäpfchen für das

---

<sup>5</sup> Albertz 2010, S. 108

<sup>6</sup> Vgl. Pietsch 1962, S. 45

<sup>7</sup> Vgl. Bahr 1991, S. 3

<sup>8</sup> Vgl. Pietsch 1962, S. 45

Farb-Sehen bzw. das Sehen bei Tageslicht und die Stäbchen für das Hell-Dunkel-Sehen bzw. das Sehen bei Nacht zuständig sind.<sup>9</sup> Schon die prozentuale Dominanz von 95% Stäbchen zu 5% Zäpfchen<sup>10</sup> lässt erkennen, dass vor allem das Hell-Dunkel-Sehen wichtiger ist und es uns damit leichter fällt, Linien und Kontraste besser zu erkennen.

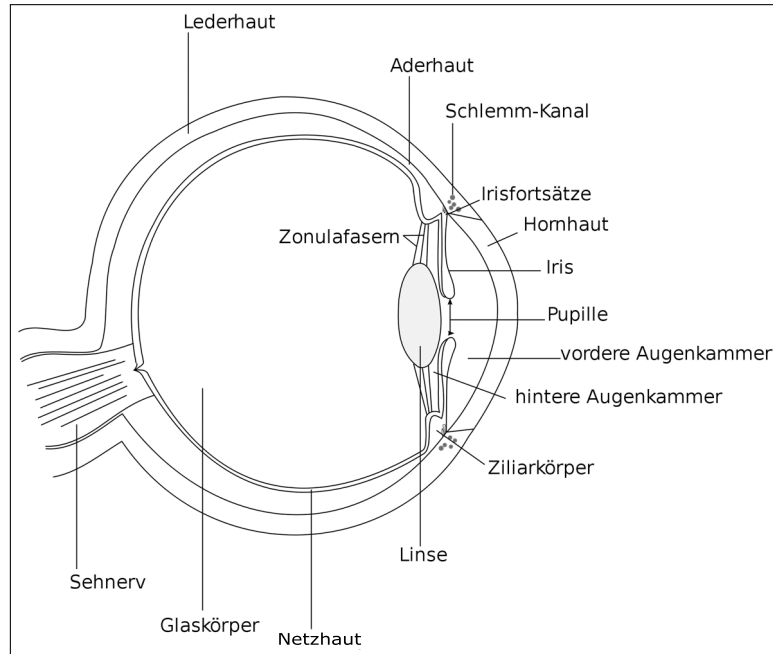


Abb. 1: Anatomie des Auges<sup>11</sup>

Das auf der Netzhaut wahrgenommene Bild wird nun über die Sehbahn des Sehnervs zum Sehzentrum in der primären Sehrinde unseres Gehirns weitergeleitet. Unscharfe und gleichmäßige Flächen bleiben für den Sehsinn zunächst uninteressant. Erst durch starke Kontraste, Kanten und Musterungen in den Bildern werden die Neuronen im Sehzentrum aktiv.<sup>12</sup> Die Mechanismen beim Sehvorgang und der Gestaltwahrnehmung sind trotz umfangreicher neurophysiologischer Untersuchungen noch nicht restlos geklärt.<sup>13</sup>

Derzeit können zwei grundlegende Verarbeitungswege ausgemacht werden, die einmal die Orientierung von Objekten im Raum (Wo befindet sich das Objekt?) und das Erkennen der Objekte selbst (Was ist das Objekt?) sind. Objekte selbst werden schnell aufgrund ihrer Objektkanten erfasst. Das Gehirn trennt die einzelnen Objekte von ihrer Umgebung und vergleicht sie mit Abbildungen in unserem Langzeitgedächtnis. Gleiches es einem bekannten Objekt wird hieraus die Assoziation gezogen, dass es sich auch tatsächlich um dieses Objekt handelt. Das Erkennen der Position, wo sich das Objekt befindet, lässt sich in zwei Bereiche einteilen: die monokulare und die binokulare Tiefenwahrnehmung. Albertz nennt noch einen weiteren Bereich, die Bewegungserkennung.<sup>14</sup> Hierbei handelt

<sup>9</sup> Albertz 2010, S. 108

<sup>10</sup> Wagner 2010

<sup>11</sup> Gubler 2007

<sup>12</sup> Albertz 2010, S. 108

<sup>13</sup> Vgl. Kuhn 1999, S. 38 f.

<sup>14</sup> Vgl. Albertz 2010, S. 108

es sich aber um einen quasistereoskopischen Effekt, der sowohl bei monokularer als auch bei binokularer Betrachtung auftritt.

### 2.2.1 Monokulare Tiefenwahrnehmung

Zu den monokularen Tiefenwahrnehmungen zählen Tiefensignale, die auch beim Sehen mit nur einem Auge (monokular) zu erkennen sind. Um aber hiermit Rückschlüsse auf die räumliche Gliederung des Gesehenen zu ziehen bedarf es besonderen Erfahrungsmerkmale. Diese Merkmale erwirbt sich der Mensch empirisch erst im Laufe seiner Entwicklung. Sie geben schon eine überraschend gute Deutung der Tiefenverhältnisse, sind aber nicht zweifelsfrei und können unter besonderen und kritischen Verhältnissen Irrtümer und Täuschungen hervorrufen. Das einäugige Sehen liefert daher nur eine Vorstellung der Tiefe, im Gegensatz zu der echten Tiefenwahrnehmung beim Sehen mit beiden Augen.<sup>15</sup>

Laut Helmholtz gehören im Wesentlichen folgende Motive zu der monokularen Tiefenwahrnehmung:

1. Die geometrische Perspektive
2. Die Luftperspektive
3. Die Verteilung der Farben innerhalb des Objektraumes
4. Die teilweise Überdeckung hintereinander liegender Objekte
5. Die Verteilung von Licht und Schatten innerhalb des Objektraumes (Schattenplastik)
6. Die vorspringenden und zurücktretenden Farben (Farbenplastik/Farbenstereoskopie)
7. Die Bewegungsplastik (Bewegungsstereoskopie/Eisenbahn-Effekt)<sup>16</sup>

Diese Tiefensignale haben sich Maler schon früh ab dem 15. Jahrhundert zunutze gemacht und realistische Darstellungen der Welt gezeichnet. Die Entdeckung der perspektivischen Konstruktion ermöglichte ihnen die proportional richtige Wiedergabe der dreidimensionalen Darstellung<sup>17</sup> von Körpern im Raum. Auf flachen Gemälden wird dadurch eine räumliche Wirkung erzielt.<sup>18</sup>

---

<sup>15</sup> Vgl. von Helmholtz 1910, S. 236

<sup>16</sup> von Helmholtz 1910, 236–249

<sup>17</sup> Höhe, Breite und Tiefe

<sup>18</sup> Vgl. Bahr 1991, S. 5 f.

## Die geometrische Perspektive

Die Perspektive gehorcht optisch-geometrischen Gesetzen und lässt sich anhand eines Beispiels von Vierling<sup>19</sup> sehr gut verdeutlichen. Eine Straße ist uns als Objekt bekannt und zieht sich mit einer gewissen Breite über eine längere Distanz hinweg (siehe Abbildung 2). Am Horizont scheint es aber so, als ob die Straße sich verjüngt und das, obwohl sie immer parallel verläuft bzw. verlaufen müsste.

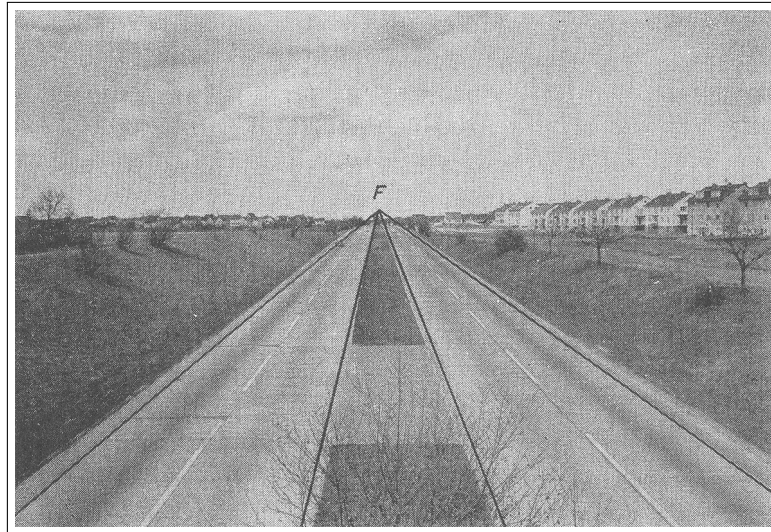


Abb. 2: Perspektivische Verkürzung (F = Fluchtpunkt)<sup>20</sup>

Das Gehirn assoziiert zu dem bekannten Objekt Straße auch eine steigende Entfernung. Der Punkt, wo sich die Straßenmarkierungen zu treffen scheinen, wird Fluchtpunkt genannt. Die Perspektive, auf die die geometrische Mitte ausgerichtet ist heißt Zentralperspektive. Von der wirklichen Entfernung von diesem Zentrum und der damit resultierenden scheinbar abnehmenden Größe der gesehenen Gegenstände erkennt unser Gehirn die jeweiligen Hinweise ihrer Tiefe.<sup>21</sup> Die wahre Größe eines Gegenstandes ist uns aufgrund unserer Erfahrung bewusst und es können somit Rückschlüsse auf die Entfernung des Gegenstandes gemacht werden.<sup>22</sup>

## Die Luftperspektive

Die Atmosphäre erscheint uns oft als trübes Medium. Sie enthält eine große Anzahl von winzigen Schwebeteilchen in Form von Staub und Wasserdunst, an denen Lichtstrahlen gestreut werden. Je größer nun die Entfernung zwischen den Objekten und unserem Standpunkt ist, umso mehr ist die Sicht getrübt. Diese zunehmende Verundeut-

<sup>19</sup> Vierling 1965, S. 13 f.

<sup>20</sup> Vierling 1965, S. 14, Abb. 10a)

<sup>21</sup> Bahr 1991, S. 7

<sup>22</sup> Hartwig, 1907, S. 6

lichung mit wachsender Entfernung gehört zu den wichtigsten Faktoren der räumlichen Tiefenwahrnehmung.<sup>23</sup>

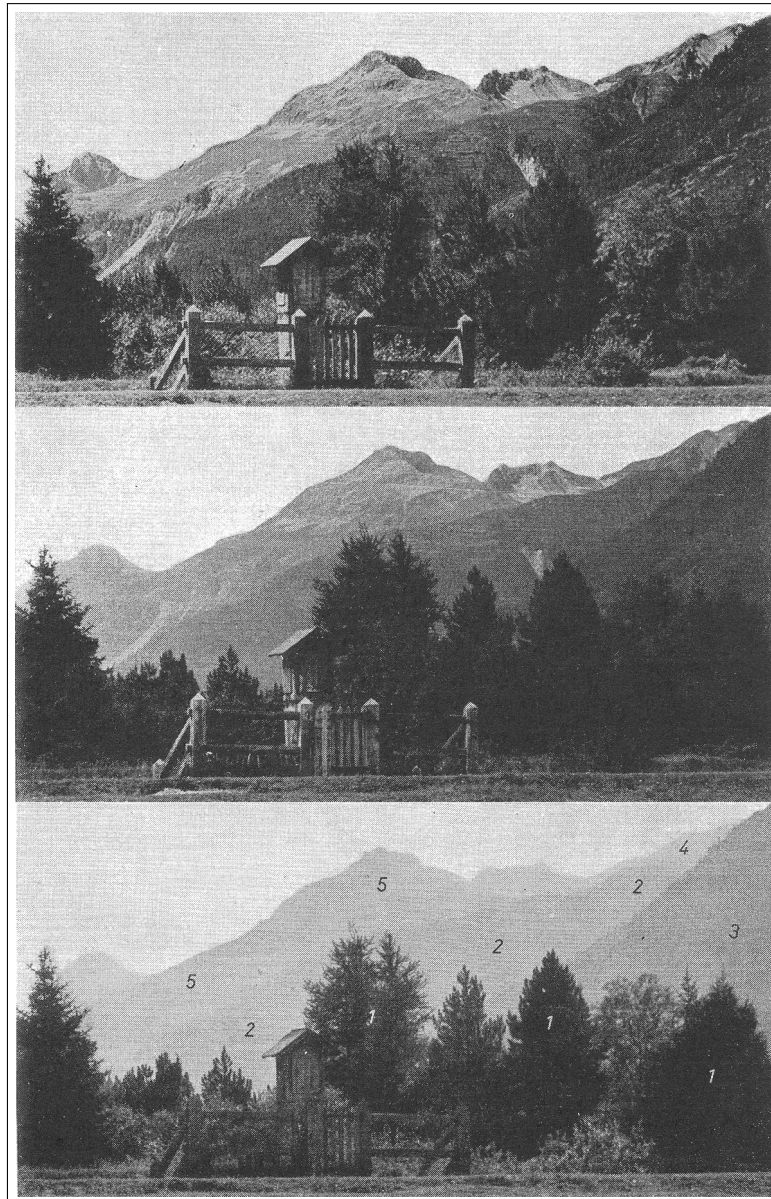


Abb. 3: Luftperspektive<sup>24</sup>

Abbildung 3 zeigt die gleiche Landschaft a) bei völlig klarer Sicht; b) bei leichterem Dunst und c) bei stärkerem Dunst. Im Bild a) wirkt der Vordergrund und Hintergrund trotz des großen Abstandes aufeinander zukleben. In den Bildern b) und c) hebt sich der Vordergrund deutlich erkennbar vom Hintergrund ab.

<sup>23</sup> Vgl. Vierling 1965, S. 17

<sup>24</sup> Vierling 1965, S. 16, Abb. 11

### Die Verteilung der Farben innerhalb des Objektraumes

Da die Luftmoleküle der Atmosphäre ebenfalls Lichtstrahlen streuen, kann die Atmosphäre bei genügend langem Strahlenweg wie ein trübes Medium wirken. Mit zunehmender Entfernung legt sich eine Art blauer Schleier über die Objekte. Objekte, die sich weiter im Vordergrund befinden, werden in wärmeren Farbtönen gesehen. Das bekannte Bild der blauen Berge in der Ferne ist somit ein Erfahrungswert, der zur Orientierung dient.<sup>25</sup>

### Die teilweise Überdeckung hintereinander liegender Objekte

Die Überdeckung ist neben der Perspektive und der relativen Größe der dominanteste Hinweisreiz. Fehlende Teilstücke eines Objektes werden bei der Wahrnehmung durch bekannte Objektformen ergänzt. Es wird aber nicht wie angenommen, erkannt, dass bei einem Objekt Teile fehlen, sondern, dass sich das Objekt hinter einem anderen Gegenstand befindet und verdeckt wird. Es wird in die Ferne gerückt und es entsteht eine räumliche Staffelung von gesehenen und erkannten Objekten.<sup>26</sup>

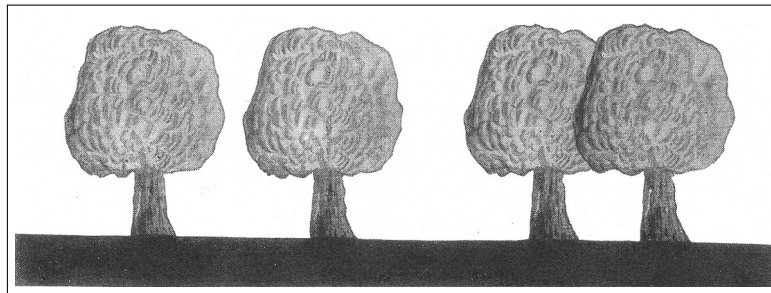


Abb. 4: Überdeckung von Gegenständen<sup>27</sup>

### Die Verteilung von Licht und Schatten innerhalb des Objektraumes

Ebenfalls großen Einfluss auf die Tiefenwahrnehmung hat die Verteilung von Licht und Schatten. Vor allem der Schlagschatten hat eine sehr starke Wirkung. Eine erhabene Stelle wirft einen Schlagschatten auf eine tieferliegende Stelle. Es erscheinen somit die „Täler“ dunkel und die „Höhen“ hell. Unser Sehorgan nimmt nun wieder unter der Annahme von gesammelten Erfahrungswerten ein plastisches Bild mit Tiefenwirkung auf.<sup>28</sup>

<sup>25</sup> Vgl. Vierling 1965, S. 17

<sup>26</sup> Albertz 2010, S. 108

<sup>27</sup> Vierling 1965, S. 18, Abb. 13

<sup>28</sup> Vgl. Vierling 1965, S. 19 f.



Abb. 5: Schattenplastik<sup>29</sup>

### Die vorspringenden und zurücktretenden Farben

Verschieden farbige Flächen und Linien, die auf einer Ebene liegen, erscheinen dem Betrachter in ungleicher Entfernung. Dies kommt zustande, da die Farbabweichungen jeweils auf einer anderen Stelle der Netzhaut abgebildet werden. Durch diesen Versatz ergeben sich scheinbare Tiefenunterschiede.<sup>30</sup>

### Die Bewegungsplastik

Bewegt sich ein Betrachter an Objekten mit unterschiedlicher Entfernung vorbei, so verändern sich die Position der Objekte in der Ferne langsamer als Objekte in der Nähe. Diese Beobachtungen lassen sich vor allem aus dem Zug oder dem Auto heraus machen.<sup>31</sup>

Die Rezeptoren auf der Netzhaut besitzen die Fähigkeit aufgrund ihrer Verschaltung untereinander schon Bewegungen auszumachen. Der Reiz der Bewegung wird somit direkt über die Sehbahn an das Gehirn weitergeleitet und der Mensch kann, bevor das Objekt selbst erkannt ist, schneller reagieren.<sup>32</sup>

Mit all diesen Motiven ergeben sich schon erste Hinweise, die einen Eindruck der Objektentfernung vermitteln. Die Faktoren sind aber, wie bereits erwähnt, mehrdeutig und können zahlreiche, mögliche Fehlerquellen enthalten. In Gebieten, die zum Beispiel nur wenig getrübt sind (Weltraum, Hochgebirge) erscheinen uns Dinge klarer und damit näher und kleiner als sie in Wirklichkeit sind. Ebenfalls hinzu kommt noch der Fakt, dass jene Tiefenkriterien größtenteils empirisch sind, also auf Erfahrungswerten basieren.<sup>33</sup> Fehlen Kenntnisse zu bestimmten Formen und Größen, kann zum Beispiel ein kleiner

<sup>29</sup> Vierling 1965, S. 19, Abb. 14

<sup>30</sup> Vgl. Vierling 1965, S. 20 ff.

<sup>31</sup> Maier 2008a, S. 15

<sup>32</sup> Albertz 2010, S. 109

<sup>33</sup> Vgl. Vierling 1965, S. 20

Mensch, der in geringer Entfernung steht als größer empfunden werden, als ein großer Mensch, der sich in weiter Entfernung befindet. Damit diese monokularen Faktoren nicht über die wirklichen Gegebenheiten hinwegtäuschen bedarf es der binokularen Tiefenwahrnehmung für eine absolute Entfernungseinstufung.

## 2.2.2 Binokulare Tiefenwahrnehmung

Erst durch das Sehen mit zwei Augen (binokular) kommen weitere Tiefenhinweise hinzu. Durch die perspektivische Verschiedenheit der beiden Netzhautbilder, also der Versatz zwischen dem rechten und linken Auge, ergibt sich das eigentliche und wichtigste Motiv der binokularen Tiefenwahrnehmung, die Querdisparation.<sup>34</sup> Die Querdisparation beschreibt den Augenabstand bei uns Menschen. Durch diesen Abstand von circa 63 Millimetern erscheint ein Objekt immer mit leicht verschiedener Perspektive auf der jeweiligen Netzhaut.<sup>35</sup>

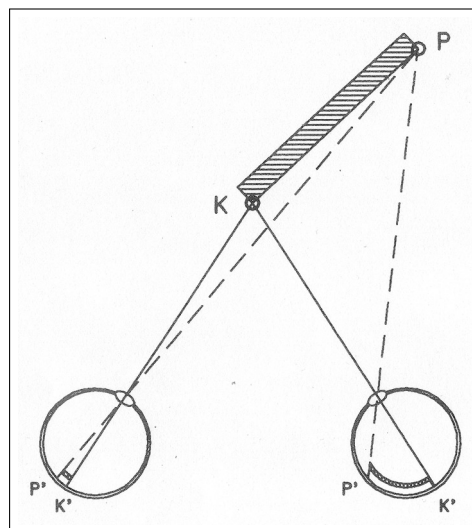


Abb. 6: Querdisparation (K = Konvergenzpunkt, P = nicht-fixierter Punkt)<sup>36</sup>

Bahr<sup>37</sup> gibt hierfür ein hervorragendes Beispiel, das Daumensprung-Experiment. Hierzu wird ein Arm ausgestreckt und auf den nach oben gerichteten Daumen geschaut. Nun wird abwechselnd ein Auge geschlossen und das andere offen gehalten. Der Daumen scheint aufgrund des jeweils unterschiedlichen Blickpunktes zu „springen“.<sup>38</sup>

<sup>34</sup> Vierling 1965, S. 23

<sup>35</sup> Albertz 2010, S. 109

<sup>36</sup> Bahr 1991, S. 12, Abb. 2

<sup>37</sup> Achim Bahr, 1956 in Köln geboren, beschäftigt sich schon seit Beginn seines Studiums der Malerei fast ausschließlich mit stereoskopischen Experimenten in Malerei und Zeichnung.

<sup>38</sup> Bahr 1991, S. 9

Dieser Unterschied wird auch binokulare Parallaxe<sup>39</sup> genannt.<sup>40</sup> Beide Augen liefern nun dem Sehzentrum in unserem Gehirn unterschiedliche Bildinformationen. Dort werden sie zu einem einzigen Bild verschmolzen, die binokulare Fusion. Um ein Objekt im Bild aber nicht doppelt zu sehen, müssen sich die Augen zuerst gemeinsam auf diesen Gegenstand richten. Dieser Vorgang wird Konvergieren genannt. Der anvisierte Gegenstand fällt nun auf einander korrespondierende Stellen beider Netzhäute. Diese Stellen korrespondieren insofern, als ihre jeweiligen, zugehörigen Nervenbahnen mit denselben Zellen des Gehirns verbunden sind. Da aber lediglich nur ein kleiner Teil der Netzhaut, die Netzhautgrube, zum deutlichen Sehen fähig ist, erfolgt noch die Scharfstellung, das Akkommodieren. Es treffen nun benachbarte Objektpunkte zwangsläufig auf andere Stellen der Netzhäute gemäß ihrer räumlichen Verteilung. Sie sind so in seitlicher Richtung gegeneinander verschoben, dass sie nicht mehr auf korrespondierende Stellen sondern auf disparate<sup>41</sup> Netzhautstellen treffen.<sup>42</sup>

Unser Gehirn erkennt für beide Augen das Objekt und ordnet beide Abbildungen demselben Objekt zu. Der Unterschied, der sich aus dem Versatz ergibt, erlaubt dem Gehirn eine absolute Entfernungswahrnehmung von 10 Metern wahrzunehmen, wobei die Genauigkeit mit steigender Entfernung abnimmt.<sup>43</sup> Theoretisch könnte eine Tiefenwahrnehmung bis zu 450 Metern erfolgen, praktisch allerdings kaum mehr als 50 Meter. Darüber hinaus geht die Parallaxe beider Augenachsen gegen null und beide Augen sind nahezu parallel nach vorne gerichtet.<sup>44</sup> Mit optischen Hilfsmitteln kann das räumliche Sehen noch erweitert werden, indem die Parallaxe mittels Fernglas vergrößert bzw. mit einem Mikroskop verkleinert wird.<sup>45</sup>

Stereoskopie, also die Kunst dreidimensional zu sehen, ist somit eine uns angeborene Fähigkeit. Um aber von ihr zur Herstellung eines dreidimensionalen Filmes Gebrauch zu machen, müssen einige Grundregeln und Gesichtspunkte beachtet werden. Eine gewöhnliche Fotografie kann die naturgetreue Wiedergabe nur beschränkt erfüllen. Der hier all umfassende, dreifach ausgedehnte Raum wurde auf eine zweidimensionale Ebene zusammengepresst. Somit ist die Beurteilung der räumlichen Tiefenwahrnehmung nur auf Grund von Erfahrungswerten möglich, kann aber nicht unmittelbar erfasst werden, wie es beim freien Sehen mit zwei Augen geschieht. Nur die Stereofotografie vermittelt uns den naturgetreuen Raumeindruck. Als wichtigste Eigenschaft zur Gewinnung des naturgetreuen Raumeindrucks müssen somit unseren Augen zwei, von der Perspektive

<sup>39</sup> Der Begriff Parallaxe kommt aus dem Griechischen und bedeutet wörtlich übersetzt Vertauschung, Abweichung. Physikalisch gesehen ist die Parallaxe, laut Duden, der Winkel, den zwei Geraden bilden, die von unterschiedlichen Standorten aus auf einen Punkt gerichtet sind.

<sup>40</sup> Bahr 1991, S. 13

<sup>41</sup> einander nicht entsprechend

<sup>42</sup> Vgl. Bahr 1991, S. 11

<sup>43</sup> Vgl. Albertz 2010, S. 109

<sup>44</sup> Vgl. Selle 1953, S. 7

<sup>45</sup> Bahr 1991, S. 13

verschiedene, Bilder präsentiert werden.<sup>46</sup> Versuche, dies zu bewerkstelligen, gab es in der Geschichte schon genügend.

## 2.3 Geschichte der Stereoskopie

Das älteste Zeugnis, das sich mit dem beidäugigen Sehen beschäftigt, stammt von Euklid, der 300 Jahre v. Chr. Mathematik in Alexandria lehrte. In seiner Schrift „*Optik*“ untersuchte er die geometrischen Verhältnisse von Erscheinungsbild und -größe eines Objektes in der Abhängigkeit der wirklichen Größe und zu seinem Abstand vom Blickpunkt des Betrachters. Zusammen mit seinem Werk „*Die Elemente*“, das die klassische Geometrie beschreibt, bilden sie die Grundlage der im 15. Jahrhundert entwickelten Zentralperspektive. Euklid machte die Entdeckung, dass beide Augen des Menschen jeweils etwas anderes und gemeinsam mehr sehen als nur eines. Doch seine rein geometrische Analyse und die der damaligen Zeit gültigen Theorie, dass Sehstrahlen von den Augen aus gesendet werden und nicht die von den Dingen ausgehenden Lichtstrahlen wahrgenommen werden, lassen seine Arbeiten nur als eine Betrachtung der quantitativen Verschiedenheit verstehen und können deshalb nicht als Prinzipien des binokularen Sehens gedeutet werden.<sup>47</sup>

Der qualitative Unterschied fiel erst dem italienischen Maler Leonardo da Vinci auf. Da er als Maler großes Interesse an Fragen der Optik besaß, befasste er sich intensiv mit dem Studium des Sehens sowie mit der Anatomie des Auges. Er führte in seinem unvollendeten und erst nach seinem Tode aus Notizen und Manuskripten zusammengestellten „*Trattato della pittura*“ (dt. Traktat von der Malerei) von 1519 auf, dass kein Gemälde die körperhafte Erscheinung eines wirklichen Gegenstandes wiedergeben könne.<sup>48</sup> An anderer Stelle seines Traktates verglich da Vinci das gespiegelte Bild eines dreidimensionalen Körpers mit dem eines gemalten Bildes. Leonardo führte hier die Begründung auf, dass auch ein Gegenstand zu erblicken sei, wenn dieser nur einäugig betrachtet, verdeckt hinter einem anderen liegt. Er erläuterte somit die räumliche Empfindung der natürlichen Wahrnehmung. Leonardo schaffte es aber trotzdem nicht, ein stereoskopisches Gemälde anzufertigen, da er anscheinend nicht erkannte, dass sich schon durch die parallaktische Differenz beider Augen ein einzelner Gegenstand aus verschiedenen Perspektiven zeigt. Leonardo machte auch den Fehler, dass er seine Untersuchungen nur an kugelförmigen Körpern durchführte, die ja bekanntlich aus allen Blickwinkeln rund erscheinen.<sup>49</sup>

Einhundert Jahre später erwähnte der deutsche Naturphilosoph, Theologe, Mathematiker, Astronom und Optiker Johannes Kepler die Existenz von Netzhautbildern. Es wurde somit erstmals ein Zusammenhang zwischen gemalten und gesehenen Bildern erwähnt.

<sup>46</sup> Vgl. Lüscher 1931, S. 7

<sup>47</sup> Vgl. Bahr 1991, S. 14

<sup>48</sup> ebenda, S. 15

<sup>49</sup> ebenda, S. 14 ff.

Er benutzte das Wort „pictura“ für das Bild auf der Netzhaut und verglich dieses mit einem Gemälde, welches unabhängig vom Betrachter vorhanden ist.<sup>50</sup>

Kurz darauf entfernte der deutsche Astronom und Optiker Pater Christoph Scheiner die äußere Hülle an der Rückwand eines Tierauges. Er konnte nun ein seitenverkehrtes und auf dem Kopf stehendes Bild auf der freigelegten Netzhaut betrachten.<sup>51</sup>

1738 experimentierte Robert Smith, ein englischer Mathematiker, mit der Verschmelzung zweier realer Objekte, die sich bei binokularer Betrachtung zu einem vereinen. Ihm gelang die allererste stereoskopische Zeichnung. Diese Zeichnung zeigt zwei sich schneidende Geraden, welche sich aber unter einem bestimmten Betrachtungswinkel und gekreuzten Blickachsen zu einer sich plastisch aus der Fläche erhebenden Linie verschmelzen. Um aber weiterführende Schlüsse aus diesen Betrachtungen zu ziehen, fehlte Smith das theoretische Fundament.<sup>52</sup>

### Entdeckung der Stereoskopie

1838 veröffentlichte Sir Charles Wheatstone, Professor für Experimentelle Naturwissenschaften am King's College in London, seine Schrift *„Über einige bemerkenswerte und bisher nicht beobachtete Erscheinungen beim beidäugigen Sehen“*. Aufgrund dieser Schrift wird ihm die Entdeckung der Stereoskopie zugeschrieben. Als Auslöser bezeichnet Wheatstone die Reflexion einer Kerzenflamme auf einer blankpolierten Scheibe einer Drehbank. Die Spiegelung schien die Scheibe bei beidäugiger Betrachtung zu durchdringen. Wheatstone stellte sich die Frage, was wohl geschähe, wenn er anstatt eines realen Gegenstandes zwei perspektivisch verschiedene Abbildungen desselben betrachtet. Um dieses Problem zu lösen, bastelte er sich eine Spiegelapparatur, die er selbst Stereoskop nannte.<sup>53</sup>

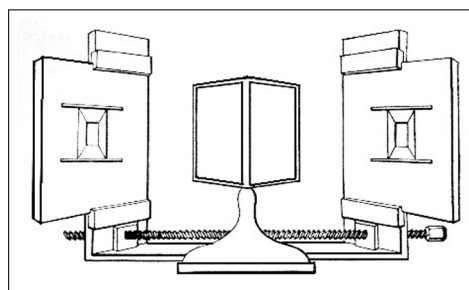


Abb. 7: Wheatstonesche Stereoskop<sup>54</sup>

<sup>50</sup> Vgl. Bahr 1991, S. 16

<sup>51</sup> ebenda, S. 16

<sup>52</sup> ebenda, S. 17

<sup>53</sup> Vgl. Bahr 1991, S. 17 ff.

<sup>54</sup> Matuschek 2010

Die Konstruktion des Stereoskops lenkt den Blick über entsprechende Spiegel auf die jeweiligen Halbbilder des rechten und linken Auges.<sup>55</sup>

Mit einem einfachen Beispiel zeigte Wheatstone die Prinzipien der Stereoskopie. Zwei Halbbilder, die zwei senkrechte Linien, aber je Halbbild in unterschiedlichen Abstand zueinander zeigen, erscheinen im Stereoskop deutlich mit Raumtiefe. Förmlich so, als würden sie hintereinander liegen. Bei weiteren Untersuchungen gelangen Wheatstone weitere Erkenntnisse, die bis heute noch ihre Gültigkeit in der Stereoskopie bewahrt haben.<sup>56</sup> Wird zum Beispiel die Anordnung der Bildpaare gegeneinander verändert, so dass das linke Auge das rechte Halbbild und das rechte Auge das linke Halbbild sehen, wird die räumliche Ausdehnung umgekehrt. Das Vordere schiebt sich nach hinten und das Hintere nach vorn (Pseudoskopie). Mit dieser Feststellung ist erkennbar, dass die monokularen Tiefensignale den binokularen untergeordnet sind.<sup>57</sup>

Aber erst 1960 konnte Bela Julesz, ein ungarischer Neurowissenschaftler, mit seiner Forschungsarbeit nachweisen, dass die Stereoskopie Priorität vor jeder Formunterscheidung hat. Mit Hilfe eines Computers erstellte er Bildpaare, die nur zufällig verteilte kleine schwarze und weiße Rasterpunkte zeigen, wobei nur ein genau begrenzter Ausschnitt seitlich verschoben wird. Ein so genanntes Random-Dot Stereogramm zeigt keine monokularen Anhaltspunkte zur Identifizierung von Objekten oder Formen. Werden diese Grafiken aber stereoskopisch betrachtet, so tritt nach der Fusion die unsichtbare Raumstruktur klar hervor.<sup>58</sup>

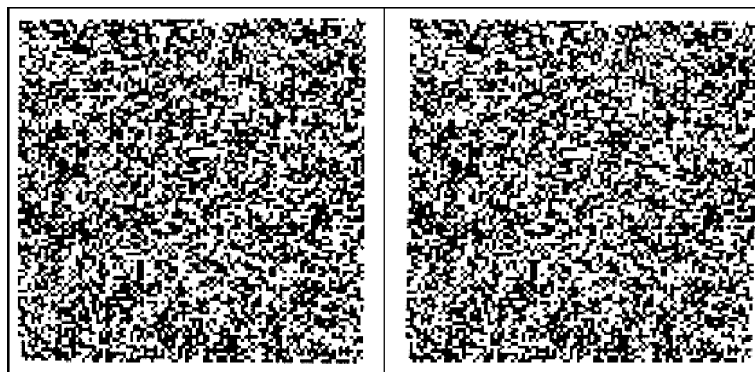


Abb. 8: Random-Dot Stereogramm<sup>59</sup>

Mit dem Stereoskop konnte Wheatstone vorerst nur grafisch angefertigte Zeichnungen betrachten, da die Fotografie zu dieser Zeit noch in ihrer Entwicklungsphase steckte.<sup>60</sup> Doch bei Zeichnungen konnten immer Ungenauigkeiten in den Halbbildern auftreten. Die

<sup>55</sup> Vgl. Röder 2007, S. 10

<sup>56</sup> Bahr 1991, S. 21 f.

<sup>57</sup> Vgl. Bahr 1991, S. 22

<sup>58</sup> ebenda, S. 23

<sup>59</sup> Nigel 2010

<sup>60</sup> Vgl. Mönks 1991, S. 4

Ungenauigkeiten ließen den Raumeindruck mindern und bei zu großen Abweichungen gar nicht erst entstehen.<sup>61</sup>

Als die fotografischen Verfahren, Abbildungen unter Verwendung chemischer Substanzen auf Metall (Daguerreotypie) bzw. auf Papier oder Glas (Kalotypie), bekannt wurden, führte der Schotte Sir David Brewster 1849 die Stereofotografie ein.<sup>62</sup> Zuerst wurden Aufnahmen mit nur einer Kamera getätigt, wobei die Kamera zwischen den zwei Bildern um den Augenabstand verschoben wurde. Da eine gewisse Zeitspanne beim Verschieben der Kamera überbrückt werden musste, war es nicht möglich bewegte Objekte zu fotografieren. Kurze Zeit später wurde die erste Kamera mit zwei Objektiven entwickelt. Da hier zwei Halbbilder gleichzeitig belichtet wurden, konnten hiermit auch bewegte Motive abgebildet werden. Die Schwierigkeit hierbei bestand aber darin, zwei gleiche Linsenpaare herzustellen.<sup>63</sup>

### **Die Frühzeit der Stereoskopie**

Von der Fachwelt wurde die Stereoskopie begeistert aufgenommen und hat durch die neu erfundene Fotografie eine enorme Verbreitung gefunden. Auch die Bevölkerung nahm die Stereo-Fotografie erfreut auf und löste eine geradezu stürmische Begeisterung aus.<sup>64</sup>

Der deutsche Unternehmer August Fuhrmann entwickelte einen zylindrische Rundlaufmaschine mit 50 handkolorierten Stereo-Dias, die über einen Drehmechanismus nacheinander gezeigt und von innen beleuchtet wurden. An einem solchen Apparat konnten 25 Personen Platz nehmen und gleichzeitig die Bilderfolgen, die vor allem aktuelle und historische Ereignisse und fremde Länder zeigten, betrachten. Dieses Gerät wurde später „Kaiserpanorama“ genannt, da selbst der deutsche Kaiser Wilhelm II. ein solches Gerät in seinem eigenen Palast besaß. Weltweit gab es ungefähr 180 Geräte. Heute befinden sich noch zwei Stück in den Stadtmuseen von München und Wels.<sup>65</sup> Abbildung 9 zeigt ein sogenanntes Kaiserpanorama.

### **Stereoskopie in der Gegenwart**

Als das Kino ab 1895 als neue Attraktion die Kaiserpanoramen verdrängte, neigte sich die erste Blütezeit der Stereoskopie dem Ende zu. Außerdem konnte jedermann durch die Verbesserung der fotografischen Verfahren, leicht und problemlos selber (Mono)-Aufnahmen machen. Die Stereoskopie hingegen war für den Laien komplizierter. Der Laie musste sich an bestimmte Regeln halten und auch die technischen Hindernisse sowohl

<sup>61</sup> Vgl. Röder 2007, S. 10 f.

<sup>62</sup> Vgl. Mönks 1991, S. 4

<sup>63</sup> Vgl. Röder 2007, S. 11

<sup>64</sup> Vgl. Bahr 1991, S. 34

<sup>65</sup> ebenda, S. 35 f.

bei der Aufnahme als auch bei der Wiedergabe standen der nachhaltigen Verbreitung der Stereoskopie im Wege. Mittlerweile ruht dieser Bereich fast völlig. Ein kleiner Kreis von Bastlern, die sich ihre Geräte und das Zubehör größtenteils selber bauen oder auf den Flohmärkten erwerben, halten den Begriff Stereoskopie noch am Leben.<sup>66</sup>

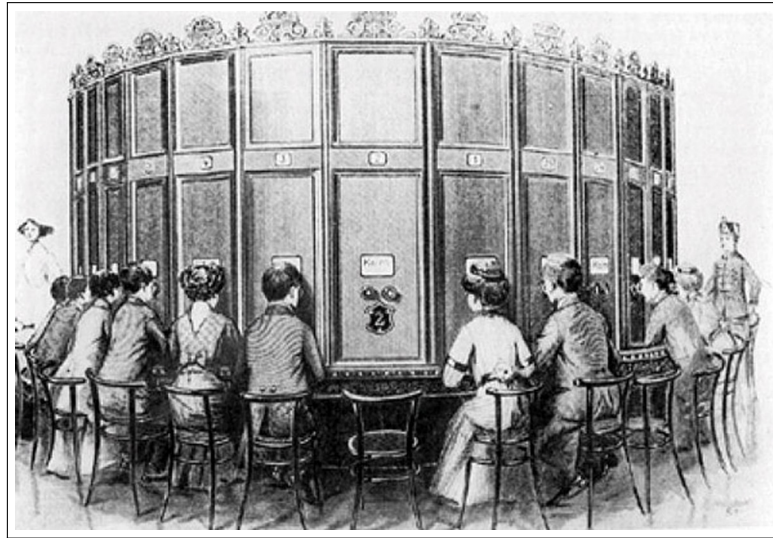


Abb. 9: Kaiserpanorama<sup>67</sup>

Die Konzentration lag aber hier zu sehr auf den massenmedialen und populären Einsatz der Stereoskopie. Gerade in diversen wissenschaftlichen, medizinischen und militärischen Gebieten bekommt die Stereoskopie eine immer wichtigere Rolle. Sie ist somit nur den öffentlichen Blicken entzogen, wird aber noch vorwiegend dort eingesetzt, wo noch mehr Rauminformationen benötigt werden.<sup>68</sup>

### Stereoskopie in Wissenschaft und Forschung

In der Wissenschaft kommt der Stereoskopie eine unbestreitbare Bedeutung zu. Sie gilt vor allem in den Bereichen, wo exakte Messungen notwendig sind, als unverzichtbar. Ihr Anwendungsgebiet erstreckt sich dabei von militärischen Zwecken bis hin zur Benutzung in der Medizin. Bahr zählt in seiner Schrift Beispiele auf, wobei hier nur einige Erwähnung finden.<sup>69</sup>

Zu militärischen Zwecken der Luftaufklärung werden aus einem Flugzeug heraus aufeinander folgende Aufnahmen mit Spezialkameras gemacht. Die stereoskopische Wirkung ist hierbei besonders stark, da ein großer zeitlicher Abstand zwischen den Bildern durch den Überflug entstanden ist.

<sup>66</sup> Vgl. Bahr 1991, S. 37 f.

<sup>67</sup> Keijzer 2010

<sup>68</sup> Vgl. Winter 2009, S. 200f.

<sup>69</sup> Vgl. Bahr 1991, S. 44 f.



Doch auch die zivile Geländevermessung nutzt diese Art der Stereoskopie, um bei späteren Auswertungen der Bilder Messungen mit hoher Genauigkeit zu erhalten. Dreidimensionale Daten über Wetterfronten und Wolkenformationen, die der täglichen Wettervorhersage dienen, liefern Satelliten aus einer noch größeren Entfernung zur Erdoberfläche. Zur Untersuchung der Mondoberfläche wurden zwei einzelne Fotografien des Mondes, die in einem Abstand von einem Monat aufgenommen wurden, benutzt und erzeugten einen plastischen Eindruck des Erdtrabanten. Mittlerweile existieren dreidimensionale Ansichten der Mond- aber auch der Marsoberfläche. Dadurch können gezielt Plätze für die Landung anhand von Stereoaufnahmen ausgesucht werden.<sup>70</sup>

Andere Einsatzmöglichkeiten finden sich in der Dokumentation und Rekonstruktion von Denkmälern und zur Unterstützung von archäologischen Ausgrabungen. Auch im Umweltschutz wird auf die Stereoskopie gesetzt. Anhand von stereoskopischen Infrarot-Luftaufnahmen wird zum Beispiel an der Schadensfeststellung von Baumbeständen gearbeitet. Zur genauen Orts- und Lagebestimmung beispielsweise von Tumoren werden stereoskopische Röntgenbilder in der Medizin verwendet, denn mikroskopisch kleine Strukturen können nur mit deren Hilfe untersucht werden.<sup>71</sup>

### **Das plastische Kino**

Zu einer hauptsächlich kommerziellen Wiederbelebung der Stereoskopie kam es, als die „3D-Wellen“ über die Kinos rollten.<sup>72</sup> Doch der Einsatz von Stereoskopie ist aufwendig, kostspielig und besonders störanfällig.<sup>73</sup> Aktuell gibt es eine neue Welle und der stereoskopische Film scheint sich zu etablieren, wenn auch nicht mit der schnellen Marktmacht, wie es sich die Produktionsfirmen vorstellen.

Die ersten Raumfilme im Anaglyphen-Verfahren kamen in den zwanziger Jahren des 20. Jahrhunderts heraus, für die sich die Zuschauer eine Rot/Grün-Brille aufsetzen mussten. Da aber mit diesen Verfahren keine Farbbilder betrachten werden können<sup>74</sup>, verlor diese Methode nach Aufkommen der ersten Farbfilme wieder an Bedeutung. 1936 wurde von Zeiss-Ikon<sup>75</sup> das erste Mal mit der Stereo-Projektion mit polarisierten Licht experimentiert, doch die Anfänge des Zweiten Weltkrieges setzten allen weiteren Unternehmungen dieser Art ebenfalls ein vorläufiges Ende. Infolge des ab 1950 etablierten Fernsehens gingen die Zahlen der Kinobesucher immer weiter drastisch zurück und die Filmindustrie schaut nach neuen Chancen, die Gunst des Publikums zurückzugewinnen und die halbleeren Säle wieder zu füllen. Doch meist der dürftige Inhalt der Filme und die fragwürdige Effekthascherei, Äxte und Pfeile, die förmlich ins Publikum fliegen, führten

<sup>70</sup> Bahr 1991, S. 44

<sup>71</sup> Vgl. Risse 2010, S. D8

<sup>72</sup> Vgl. Hayes 1989 und Koshof 2002, S. 350

<sup>73</sup> Vgl. Winter 2009, S. 201

<sup>74</sup> siehe Kapitel 3.2.1, Physikalische Strahlenauslese im Anaglyphenverfahren

<sup>75</sup> Zeiss-Ikon ist eine Firmengruppe, die durch den Zusammenschluss mehrerer Kamerahersteller im Herbst 1926 entstand.

und führen immer mehr zu Diskreditierung des stereoskopischen Kinos.<sup>76</sup> Filme erzählen außerdem ihre Geschichten vorwiegend diegetisch<sup>77</sup> und narrativ, was eine zusätzliche Rauminformation überflüssig macht.<sup>78</sup>

Doch für das „gewöhnliche“ Kino wurde 3D erneut attraktiv, als es technologisch vereinfacht und ökonomisch erschwinglich wurde. Es war somit die Digitalisierung des Mediums, die der neuerlichen Ausweitung in das Raumbildliche half. Die meisten digitalen Abspielstellen rüsteten sich in diesen Jahren auch auf 3D auf.<sup>79</sup>

### 3D im Fernsehen

Gegenwärtig beziehen sich wieder etliche Forschungsarbeiten auf das Thema Übertragung und Wiedergabe dreidimensionaler Fernsehbilder. Vor allem die besonderen technischen Anforderungen können jetzt auch auf Empfängerseite bewältigt werden, doch an adäquaten Angeboten hinsichtlich sendefähiger 3D-Filme fehlt es derzeit immer noch. Auch das derzeitige ständige Tragen einer Brille zum Erleben der Tiefenwirkung schreckt noch viele Benutzer ab sich einen 3D-Fernseher zu kaufen. Es gibt aber auch einige andere Methoden, die gänzlich auf Benutzung der Hilfsmittel verzichten.<sup>80</sup>

In den letzten Jahren ist auch ein steigendes Interesse am räumlichen Fernsehen (3D-TV) parallel zur Entwicklung des HD<sup>81</sup>-Fernsehens zu verzeichnen. Die Technik ist inzwischen vergleichsweise günstig herzustellen und zudem leicht in die bestehenden Unterhaltungselektronik-Serien integrierbar.<sup>82</sup> Eine aktuelle, repräsentative Umfrage im Auftrag des Hightech-Verbandes BITKOM ergab, dass 16 Millionen Verbraucher sich einen 3D-Fernseher kaufen wollen, das ist jeder sechste Deutsche. Fast jeder Dritte interessiert sich für diese Technologie. Das Institut Aris befragte für diese Umfrage tausend Personen ab 14 Jahren.<sup>83</sup>

Bei der Ausarbeitung eines neuen Fernsehkonzeptes des HD-TVs sollten aber zur Festlegung zukünftiger Normen auch die Möglichkeiten und Belange eines 3D-Fernsehens mit berücksichtigt werden.<sup>84</sup>

---

<sup>76</sup> Vgl. Bahr 1991, S. 39 ff.

<sup>77</sup> Diegetisch ist ein analytischer Begriff der Erzähltheorie. Er lenkt die Aufmerksamkeit auf den Sachverhalt, ob etwas innerhalb oder außerhalb von der erzählten Welt ist. Zum Beispiel: Eine Hintergrundmusik ist nichtdiegetisch, eine von sichtbaren Instrumenten gespielte Musik diegetisch.

<sup>78</sup> Vgl. Bordwell 1985, S. 156-204

<sup>79</sup> Vgl. Seesslen 2010, S. D2

<sup>80</sup> Vgl. Bahr 1991, S. 41 ff.

<sup>81</sup> High Definition Television (engl. für hochauflösendes Fernsehen) ist ein Sammelbegriff, der eine Reihe von Fernsehnormen bezeichnet, die sich gegenüber dem Standard Definition Television (SDTV) durch eine erhöhte vertikale, horizontale oder temporale (Bildwiederholfrequenz) Auflösung auszeichnen.

<sup>82</sup> Vgl. Hirsch 2010, S. D16

<sup>83</sup> Vgl. Baumgärtner 2010

<sup>84</sup> Vgl. Kost 1988, S. 67

## 3 3D-TV Systeme

Wie bereits erwähnt, vermitteln herkömmliche monoskopisch-flache Gemälde und Fotografien nur eine annähernde Illusion von Räumlichkeit.<sup>85</sup> Der plastische Eindruck im Stereoskop hingegen wird durch die binokulare Verschmelzung von zwei Bildern ausgelöst.<sup>86</sup> Im ersten Fall handelt es sich also mehr oder weniger um eine optische Täuschung.<sup>87</sup> Doch sowohl in der Herstellung als auch in seiner Betrachtung unterliegt die Stereoskopie bestimmten Voraussetzungen und Bedingungen.

### 3.1 Voraussetzungen und Bedingungen

Entsprechend den zwei Netzhautbildern muss ein Stereobild auch aus zwei Halb- oder Teilbildern bestehen. Sie sind somit die Substitute der beiden Bilder, die sich beim natürlichen Sehen ergäben. Der Fusionsvorgang, der danach in unserem Gehirn vollführt wird, wird normalerweise nicht bewusst erlebt, rückt aber beim Blick auf das Raumbild geradezu in den Mittelpunkt der Aufmerksamkeit. Die Teilbilder müssen weitgehend inhaltsgleich sein, aber nicht geometrisch deckungsgleich.<sup>88</sup> Hiermit ist auch schon erkennbar, dass wenn die Aufnahme beider Teilbilder nicht synchron erfolgt, es keine Bewegung im Bild geben darf.<sup>89</sup> Schon langsam weiterziehende Wolken oder der Wind im Baumwipfel können den Stereo-Effekt empfindlich stören oder zerstören. Würden beide Teilbilder hundertprozentig deckungsgleich sein, würde ebenfalls keine Stereowirkung, aufgrund der fehlenden Disparation, eintreten. Allerdings gibt es in jeder Stereoaufnahme einen kleinen Bereich der deckungsgleich ist. Die Begrenzung hierfür verhält sich wie der Rahmen einer Öffnung durch die der Betrachter auf das Raumbild blickt. Beim Stereofilm bildet die Leinwand einen Teil des Raumbildes. Sie wirkt dabei wie ein Fenster, durch das man einen dreidimensionalen Raum mit unterschiedlich weit entfernten Punkten wahrnehmen kann. Diese Begrenzung wird auch Scheinfenster genannt und ist wesentlicher Bestandteil der Stereoskopie. Es hilft zu unterscheiden, ob sich ein Gegenstand vor oder hinter dieser imaginären Fläche befindet und damit verbunden, ob der Gegenstand scheinbar aus dem Bild herausragt oder in den Hintergrund zurückweicht.<sup>90</sup> Es gilt aber auch die Regel, dass keine Objekte vor dem Scheinfenster angeschnitten werden dürfen. Die Gegenstände sollten sich möglichst in der Bildmitte befinden. Werden Objekte angeschnitten, kommt es zu einem Wettstreit zwischen monokularer Verdeckung und dem binokularen Raumempfinden. Das bedeutet, dass unser Gehirn den perspektivisch zugehörigen Teil eines Objektes sucht, der sich in diesem Falle außerhalb des Scheinfensters

<sup>85</sup> siehe Kapitel 2.2.1

<sup>86</sup> siehe Kapitel 2.2.2

<sup>87</sup> Bahr 1991, S. 24

<sup>88</sup> ebenda, S. 24

<sup>89</sup> siehe Kapitel 2.3

<sup>90</sup> Vgl. Bahr 1991, S. 25

befinden müsste. Die Leinwand begrenzt aber unseren virtuellen Raum und somit sind die fehlenden Teile nicht vorhanden.

Bei der Betrachtung einer Stereoskopie handelt es sich nicht um einen reellen Raum, in dem man sich bewegen kann, sondern um einen virtuellen Raum, auf den der Betrachter blickt bzw. hindurch schaut. Beim natürlichen Sehen wird der gesamte Raum nicht gleichzeitig erfasst, sondern unsere Augen springen von einem Punkt zu einem anderen und bilden so einen räumlichen Gesamteindruck. Akkommodation und Konvergenz sind dabei gekoppelt. Betrachtet man hingegen ein stereoskopisches Bild, werden die Akkommodation und die Konvergenz entkoppelt, d.h. die Augen stellen sich genau auf einen Punkt der Projektion scharf, und zwar auf den, der der Entfernung der Leinwand entspricht.<sup>91</sup> Das gesamte Bild muss somit von vorn bis hinten scharf abgebildet sein, ansonsten könnten die Augen nicht akkomodieren und die Raumwirkung bleibt wegen den fehlenden fusionsfähigen Konturen im unscharfen Bereich aus.<sup>92</sup> Die Konvergenz hingegen richtet sich nach der Entfernung der Punkte im stereoskopischen Raum. Je näher sich also ein Punkt befindet, desto stärker konvergieren die Augen. Diese unnatürliche Entkopplung von Akkommodation und Konvergenz stellt somit eine besondere Herausforderung an die menschliche Physiologie dar.<sup>93</sup> Werden bestimmte Regeln bei der Herstellung von stereoskopischen Aufnahmen missachtet, können physische Probleme, wie etwa Kopfschmerzen oder Unwohlsein auftreten.

Die meisten Fehler entstehen schon bei der Aufnahme von stereoskopischen Bildern. Ein Beispiel wäre hier der Höhenfehler. Dieser Fehler tritt auf, wenn ein Objektiv höher als das andere steht. Beide Bilder können somit nicht mehr richtig in Deckung gebracht werden.<sup>94</sup> Alle Parameter einer Kamera und deren Optik sollten möglichst aufeinander abgestimmt sein. Bereits eine geringe Abweichung in Schärfe oder Helligkeit kann den räumlichen Seheindruck mindern oder gar zerstören. Eine weitere wichtige Grundregel ist das Divergenzverbot. Dieses besagt u.a.:

*“[...] daß korrespondierende Bildpunkte ferner Objekte beim Aufeinanderprojizieren der Stereo-Halbbilder nicht mehr als es dem Augenabstand entspricht gegeneinander verschoben sein dürfen.”<sup>95</sup>*

In diesem Falle müssten unsere Augen divergieren<sup>96</sup> und dies entspricht nicht mehr dem natürlichen Sehen und ist physiologisch nur bedingt möglich.

Um das Bild möglichst tautomorph<sup>97</sup> wiederzugeben, müssen die Gesetzmässigkeiten der monoskopischen Perspektive eingehalten werden. Die Stereowirkung wird näm-

<sup>91</sup> Vgl. Kuhn 1999, S. 21 f.

<sup>92</sup> Vgl. Bahr 1991, S. 25

<sup>93</sup> Vgl. Kuhn 1999, S. 21 f.

<sup>94</sup> Vgl. Stolze 1908, S. 25 f.

<sup>95</sup> Kuhn 1999, S. 25

<sup>96</sup> Divergieren bedeutet auseinander gehend, in entgegengesetzter Richtung verlaufend. Im Bereich der Augenoptik wird damit das Schielen (Strabismus) bezeichnet.

<sup>97</sup> naturgetreu

lich auch hier eingebüßt, wenn der Blickpunkt des Betrachters nicht mehr mit dem ursprünglichen Perspektivitätszentrum übereinstimmt. Es entstehen Verzerrungen der Raumwirkung und das Bild erscheint heteromorph<sup>98</sup>. Dies ist auch ein Problem der heutigen großen Kinos, die 3D-Filme zeigen. Wird sich der Film aus einem der hintersten Plätze angeschaut, erscheint die Raumtiefe übertrieben stark (gestreckt), aus der ersten Reihe hingegen wirkt die Raumtiefe flach (gestaucht).

Eine gezielte Manipulation, innerhalb der physiologischen Bereiches, ist natürlich gestattet. Sie ermöglicht die Schaffung von stereoskopischen Räumen, die in Wirklichkeit gar nicht vorhanden sind. Wird der Abstand der beiden Projektionszentren gegenüber des normalen Augenabstandes vergrößert oder verkleinert, hat dies eigentümliche Auswirkungen auf das Stereobild zur Folge, die als „Liliputismus“ oder „Gigantismus“ bezeichnet werden.<sup>99</sup> Der Liliputismus tritt ein, wenn der Abstand extrem vergrößert wird. Dies kann als sinnvoll betrachtet werden, wenn Objekte, die sich weit im Bild befinden, noch mit einem Stereoeffekt versehen werden soll. Diese Abstandsvergrößerung steigert damit die Plastizität, aber lässt die Szene auch viel kleiner erscheinen und wirkt daher wie ein Modell. Bei verringertem Abstand nimmt der räumliche Effekt ab, aber die nun abgebildeten Gegenstände wirken überproportional groß.

## 3.2 Methoden

Um nun einen Raumeindruck zu erzeugen ist es unbedingt erforderlich die zwei Bildhälften unseren Augen getrennt darzubieten, so dass das jeweilige Auge auch nur das ihm perspektivisch zugeordnete Bild sieht.<sup>100</sup>

Fritz Waack, ein deutscher Ingenieur und Pionier der Stereofotografie, stellt dafür eine Liste mit verschiedene Verfahren zur Verfügung:

### 1. Siebverfahren

- a) geometrische Strahlenauslese im Betrachter
- b) physikalische Strahlenauslese mit Anaglyphen- oder Polarisationsverfahren
- c) zeitlich Strahlenauslese durch Sukzessiv-Wiedergabeverfahren

### 2. Spreizverfahren (Bildtrennung durch Rasterverfahren)<sup>101</sup>

---

<sup>98</sup> verzerrt

<sup>99</sup> Vgl. Bahr 1991, S. 27

<sup>100</sup> Vgl. Bahr 1991, S. 28

<sup>101</sup> Waack 1979, S. 25

### 3.2.1 Siebverfahren

#### Geometrische Strahlenauslese

Eine Betrachtung der zwei Teilbilder ohne Hilfsmittel ist nur dann möglich, wenn sich von der angeborenen Kupplung von Konvergenz und Akkomodation freigemacht werden kann. Mit etwas Übung ist dies auch möglich, führt aber rasch zur Ermüdung und unbefriedigenden verzerrten Raumeindrücken.<sup>102</sup>

Das von Charles Wheatstone gebaute Stereoskop lenkt die Blickrichtung mittels zweier Spiegel auf die jeweiligen Teilbilder.<sup>103</sup> Diese einfache Art der Betrachtung hatte natürlich den Nachteil, dass die Teilbilder schon vorher seitenverkehrt abgebildet werden mussten, da ein Spiegel ein Bild schon seitenverkehrt abbildet. Mit Hilfe einer zweifachen Reflexion, entweder mit zwei weiteren Spiegeln oder Prismen, konnte das jeweilige Teilbild auch wieder seitenrichtig dargestellt werden. Dieses Prinzip wird auch vorwiegend heute noch eingesetzt, beispielsweise in der Photogrammetrie<sup>104</sup> zur Vermessung der räumlichen Lage von Objekten.

#### Physikalische Strahlenauslese im Anaglyphenverfahren

Das berühmteste Mittel zur stereoskopischen Bildtrennung ist natürlich die kuriose „3D-Brille“. Dieses Hilfsmittel ist aufgrund ihrer hohen Popularität geradezu ein Inbegriff der Stereoskopie.<sup>105</sup>

Wilhelm Rollmann, ein deutscher Mathematiker, forschte 1853 mit der spektralen Eigenschaft des Lichtes, um die lästigen Betrachtungsbefehle der Stereoskopie auszuschalten und den Stereoeffekt auf eine andere Art und Weise zu erzielen. 1894 entwickelte der französische Fotopionier der Farbfotografie, Louis Ducos du Hauron, endgültig das Anaglyphen-Verfahren.<sup>106</sup>

„Aná glyphikós“ ist griechisch und bedeutet „erhabenes Relief“. <sup>107</sup> In der Anaglyphentechnik werden Bilder übereinander abgebildet. Hierzu werden laut DIN<sup>108</sup> die Farben rot und grünblau verwendet. Diese Farben sind so genannte Komplementärfarben, das heißt, sie befinden sich im Oswald'schen Farbkreis genau gegenüber und ergeben bei

<sup>102</sup> Vgl. Vierling 1965, S. 122

<sup>103</sup> siehe Abbildung 7: Das Wheatstonesche Stereoskop

<sup>104</sup> Die Photogrammetrie ist eine Messmethode und ein Auswerteverfahren der Fernerkundung, um aus den Messbildern die räumliche Lage oder seine dreidimensionale Form zu bestimmen.

<sup>105</sup> Bahr 1991, S. 29

<sup>106</sup> Vgl. Bahr 1991, S. 29 f.

<sup>107</sup> Vgl. Maier 2008b, S. 15

<sup>108</sup> Norm DIN 6170 Blatt 1

subtraktiver Betrachtung schwarz. Werden diese Filter gemeinsam hintereinander gegen das Licht gehalten, so müssen sie dementsprechend lichtundurchlässig sein.<sup>109</sup>

Beim Betrachten durch die spezielle Brille wird immer jeweils das dem Auge nicht zugehörige Halbbild zum Verschwinden gebracht und es entsteht der angestrebte Stereoeffekt.<sup>110</sup> Laut der DIN-Norm<sup>111</sup> wird das linke Halbbild grünblau und das rechte immer rot dargestellt. Der grüne Filter lässt somit nur grünes Licht passieren. Dieses erscheint dann hell und die roten Bildteile dunkel. Analog dazu arbeitet der rote Filter.<sup>112</sup> Da einzelne Farben hier aber reduziert werden, kann mit diesem Verfahren keine Farbwiedergabe erfolgen und es kommt daher nur bei Schwarz/Weiß-Bildern zum Einsatz.

Ein weiteres Problem ist die schlechte Kanaltrennung. Sie wird durch die unvollständige Bildtrennung der jeweiligen Farbfilter der Brille verursacht. Für eine Fusion der beiden Halbbilder ist dies aber sehr hinderlich und kann beim Betrachter bei zu langer Anwendung zu Unbehagen und Kopfschmerzen führen.<sup>113</sup>

Die Einfachheit dieses Verfahrens wurde neben den zahlreichen 3D-Filmen in den fünfziger Jahren unter anderem auch für Comic-Hefte verwendet. Da aber die Herstellung von echten stereoskopischen Zeichnungen, wie anfangs erwähnt<sup>114</sup>, sehr schwierig und aufwendig ist, wird sich nur auf tiefengestaffelte Bildebenen beschränkt und die Comics wirken „kulissen“-artig.<sup>115</sup>

### **Physikalische Strahlenauslese im Polarisationsverfahren**

Für die Wiedergabe von Farben muss ein anderes Verfahren angewendet und mit neutralgrauen Filtern gearbeitet werden.<sup>116</sup> Hierbei kommt die Polarisation des Lichtes zum Einsatz. Dieses Verfahren wurde bereits 1891 von John Anderton patentiert.<sup>117</sup>

Licht schwingt normal in alle Richtungen (siehe Abbildung 10). Wird aber ein Filter benutzt, der vereinfacht als ein sehr enges Gitter aus parallelen sehr dünnen Fäden dargestellt werden kann, wird nur der in Fadenrichtung schwingende Anteil durchgelassen. Das Licht wird polarisiert. Diese Filter werden deshalb auch Polarisationsfilter oder abgekürzt Pol.-Filter genannt.

Indem jedem Auge und dem Wiedergabegerät zwei Polfilter zugeordnet werden, kann die gewünschte Bildtrennung erreicht werden. Die jeweiligen Filter müssen zueinander

<sup>109</sup> Vgl. Waack 1979, S. 27

<sup>110</sup> Pietsch 1962, S. 194

<sup>111</sup> Norm DIN 6170 Blatt 1

<sup>112</sup> Vgl. Maier 2008b, S. 15

<sup>113</sup> ebenda

<sup>114</sup> siehe Kapitel 2.3

<sup>115</sup> Bahr 1991, S. 30

<sup>116</sup> Vgl. Waack 1979, S. 28

<sup>117</sup> Anderton 1891

parallel und gegeneinander gekreuzt angeordnet sein. Da die Filter außerdem wie ein Graufilter wirken, kommt nur noch ein Teil des Lichtes hindurch. Die Güte der Polfilter wird meist durch den Grad der erreichbaren Dunkelheit angegeben. Filme müssen daher mit doppelter Lichtintensität aufgenommen werden, um den Verlust der Helligkeit zu kompensieren.<sup>118</sup>

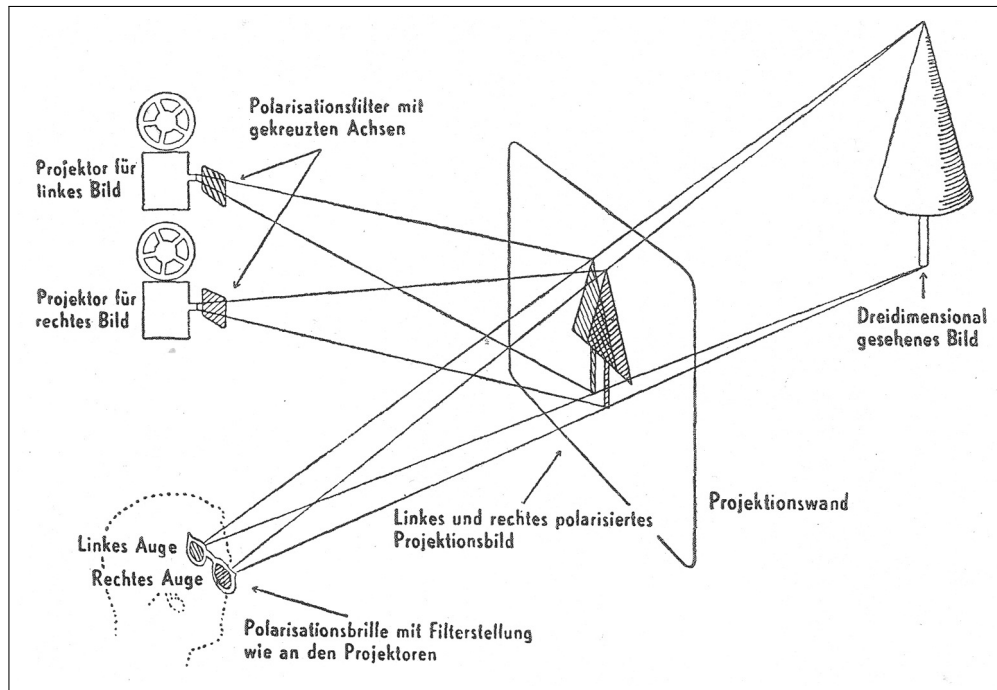


Abb. 10: Polarisationsverfahren<sup>119</sup>

Außerdem kommt polarisiertes Licht auch in der freien Natur vor. Hier schwingt es meistens senkrecht oder waagrecht. Um Störungen zu vermeiden, werden laut DIN<sup>120</sup> die verwendeten Pol.-Filter unter  $45^\circ$  angeordnet, das heißt die Schwingungsrichtungen bilden ein „V“.<sup>121</sup>

Ein weiterer Nachteil ist die zu verwendende Projektionsfläche. Damit das Licht nicht wieder depolarisiert wird, also die Polarisation wieder aufgehoben wird, können nur so genannte „Silberleinwände“ benutzt werden. Diese Leinwände werden mit einer Aluminium-Bronze-Schicht bespritzt und sind in ihrer Herstellung sehr aufwendig. Meist ist auch der darauf verwendete Schutzlack wieder depolarisierend und die Leinwand damit nicht mehr stereotauglich.<sup>122</sup>

Ein weiteres Verfahren, welches mit zu der physikalischen Strahlenauslese gezählt werden kann, ist die Wellenlängenmultiplextechnik. Hier werden die Farbinformationen rot,

<sup>118</sup> Vgl. Waack 1979, S. 28

<sup>119</sup> Pietsch 1959, S. 231, Abb. 180

<sup>120</sup> Norm 19040 Blatt 8

<sup>121</sup> Vgl. Waack 1979, S. 29

<sup>122</sup> ebenda, S. 29



grün und blau der beiden stereoskopischen Halbbilder zueinander im Frequenzbereich verschoben (siehe Abbildung 11).

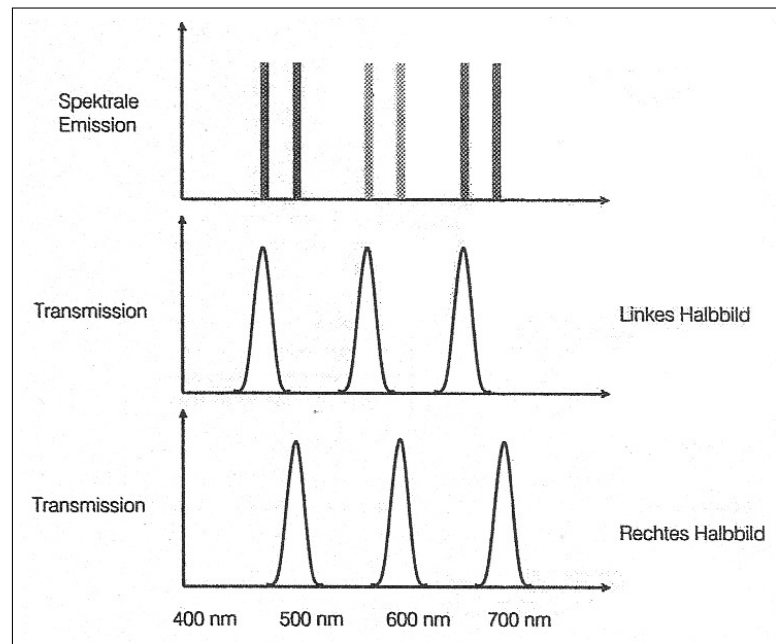


Abb. 11: Wellenlängenmultiplextechnik<sup>123</sup>

Die Gläser der Spezialbrille lassen für das linke Auge nur die jeweils unteren Wellenlängenbereiche bzw. das rechte Auge nur die oberen Wellenlängenbereiche einer Grundfarbe passieren. Durch dieses Verfahren ist die Übertragung von farbigen Bildern möglich. Bei diesem Verfahren kommt es zu einer leichten Farbänderung in den beiden stereoskopischen Halbbildern, die aber durch eine eventuelle Signalvorverarbeitung kompensiert werden kann. Die Lichtverteilung ist somit homogener als beim Polarisationsverfahren. Nachteilig sind hierbei aber die hohen Kosten in der Herstellung der 3D-Brillen, da diese eine Spezialbeschichtung mit zahlreichen Bedampfungsschichten benötigen.<sup>124</sup>

### Zeitliche Strahlenauslese durch sukzessive Wiedergabe

Ein anderes Verfahren, ist die Methode der zeitlichen Bildtrennung. Dabei wird das linke und das rechte Halbbild sukzessiv, nacheinander, auf die Leinwand projiziert. Das zugehörige Auge wird dabei freigehalten und das andere verdeckt.<sup>125</sup>

Bei einer geeigneten Bildwechselfrequenz wird durch die Fusionierung des momentanen Bildeindrucks des einen Auges mit dem Nachbild des anderen Auges der Stereo-Effekt herbeigeführt. Die Idee der sukzessiven Wiedergabe stammt von Charles d'Almeida<sup>126</sup>,

<sup>123</sup> Maier 2008a, S. 19

<sup>124</sup> Vgl Maier 2008b, S. 19 f.

<sup>125</sup> ebenda

<sup>126</sup> Vgl. von Rohr 1908, S. 103 f.

der auch schon maßgebend mit an der Entwicklung der Anaglyphentechnik beteiligt war.<sup>127</sup>

Die Schwierigkeit in sukzessiven Wiedergabe liegt im Öffnen und Schliessen der Augenabdeckung, denn diese muss nicht nur zeitsynchron, sondern auch noch stellungs-synchron erfolgen. Auch die starke Augenbelastung wirkt sich sehr nachteilig aus.<sup>128</sup> In früheren Versuchen wurden den Besuchern spezielle Apparaturen mit einer mechanischen Blende aufgesetzt. Diese Blenden wurden im Takt des Projektionsrhythmus vor dem Auge geöffnet und geschlossen. Wegen des daraus entstanden charakteristischen Geräusches wurde diese Brillen auch „Klapperbrillen“ genannt.<sup>129</sup> Die moderne Elektronik hingegen benutzt heutzutage lautlose Flüssigkristall-Verschlüsse und zur Synchronisierung mit dem Projektor eine Infrarot-Steuerung.<sup>130</sup>

### 3.2.2 Spreizverfahren

Außer den hier bereits genannten Verfahren, die die Bildtrennung durch Spiegel, Prismen, Linsen, Filtern und Blenden hervorrufen und auf den Gebrauch von Hilfsmitteln zurückgreifen, gibt es auch Verfahren, die die Möglichkeit zur Betrachtung von stereoskopischen Bildern oder Filmen ohne solcher Hilfsmittel ermöglichen. Das bekannteste Beispiel hierfür sind vermutlich die 3D-Postkarten. Bekannt ist auch ihre raue Oberflächenstruktur, die von einem Raster aus zahlreichen kleinen zylindrischen Linsenstreifen, die das Bild in vertikaler Richtung bedecken, herrührt.<sup>131</sup>

Dieses Verfahren wird Raster- bzw. Linsenrasterverfahren genannt und ist auf den Franzosen Berthier (1898) zurückzuführen, wurde aber erst 1903 von dem amerikanischen Physiker und Erfinder Herbert E. Ives weiterentwickelt und von dem russischen Ingenieur und Stalinpreisträger Simon P. Iwanow endgültig hergestellt. In ein feines Liniensystem zerlegt, werden die beiden stereoskopischen Teilbilder so übereinander gedruckt, dass immer abwechselnd das Bild für das rechte Auge und das Bild für das linke Auge abgebildet werden.

Um aber den Blickwinkel nicht starr fixieren zu müssen und dem individuell verschiedenen Augenabstand Rechnung zu tragen, bleibt die Anzahl der Teilbilder nicht auf zwei beschränkt, sondern wird auf vier oder mehr erhöht. Durch diese Erhöhung bleibt auch dem Betrachter ein gewisses Maß an Bewegungsfreiheit. Ein besonderes Merkmal ist außerdem, aufgrund der Darstellung mehrerer möglichen Parallaxen, die Wahrnehmung

---

<sup>127</sup> Bahr 1991, S. 31

<sup>128</sup> Vgl. Waack 1979, S. 29 f.

<sup>129</sup> Bahr 1991, S. 31 f.

<sup>130</sup> Vgl. Maier 2008b, S. 18

<sup>131</sup> Vgl. Bahr 1991, S. 32 f.

von unterschiedlichen Perspektiven, so dass es möglich ist, teilweise um ein einzelnes Objekt "herumzublicken".<sup>132</sup>

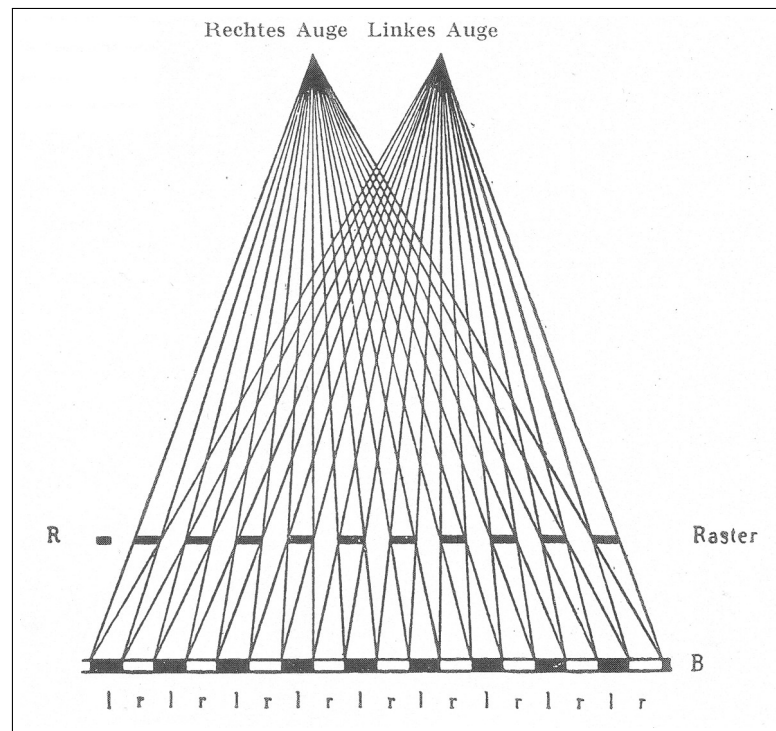


Abb. 12: Bildtrennung mit Hilfe von Sichtrastern<sup>133</sup>

1940 wurde in Moskau das weltweit erste brillenlose 3D-Kino eröffnet. Dieses Kino arbeitete mit einer Stereoprojektion auf große Drahttrasterflächen. Ein weiteres kam 1947 hinzu und insgesamt gab es in der damaligen Sowjetunion vier solcher Kinos, wobei das zweite schon mit dem bei Weitem besseren, optischen Linsenrastern betrieben wurde.<sup>134</sup> Im nachfolgenden Kapitel wird weiter auf die Art der so genannten autostereoskopischen Verfahren und insbesondere auf die Integral Fotografie, die keine mechanischen Raster mehr benutzt, sondern ein optisches Linsensystem, eingegangen.

Ein weiteres, dreidimensionales Abbildungsverfahren ist die Holographie, doch aufgrund ihrer vollkommen eigenständigen und komplexen Methode hat dieses Verfahren nichts mit den stereoskopischen Techniken gemeinsam.

### 3.3 Grundtechniken

Wie bereits erwähnt, bedarf es zur Wiedergabe eines stereoskopischen Filmes zweier Halb- bzw. Teilbilder. Wenn es sich hierbei um eine Fotografie handelt, kann jeder handelsübliche Fotoapparat benutzt werden. Dieser wird dazu auf eine Schiene oder

<sup>132</sup> Bahr 1991, S. 32 f.

<sup>133</sup> Kost 1988, S. 67, Bild 1

<sup>134</sup> Vgl. Bahr 1991, S. 33

Wippe montiert. Es wird nun eine Aufnahme belichtet und danach die Kamera um den Abstand der Augen verschoben und eine weitere Aufnahme getätigt. Hierbei muss aber darauf geachtet werden, dass sich das zu fotografierende Objekt nicht bewegt. Sollen bewegte Objekte fotografiert werden bzw. soll ein stereoskopischer Film gedreht werden, kommt nur eine synchrone<sup>135</sup> Belichtung in Frage. Die ideale Lösung ist hier eine Stereokamera mit zwei Objektiven, gekoppelter Blende und Verschlusszeit sowie Fokussierung.<sup>136</sup>

Die Grundtechniken zur Erzeugung von 3D-Filmen sind nicht neu und wurden schon seit den Anfangsjahren der Stereoskopie genutzt. Lediglich das Aufnahmeformat hat sich vom Film mit der Emulsionsschicht zum digitalen Medium gewandelt. Neben der enormen Platzmenge zur Datenspeicherung bietet die Digitalisierung zudem den großen Vorteil, Aufnahmen direkt auf einem Monitor zu betrachten und damit die Bildwirkung sofort überprüfen zu können. Das Risiko einer fehlerhaften Aufnahme wird dadurch vermindert und aufwendige nachträgliche Korrekturen beseitigt.

### 3.3.1 Synchronisierung

Eine Aufnahme mit zwei Kameras zur Erzeugung der zwei Halbbilder klingt zunächst recht einfach, entpuppt sich aber beim genaueren Hinsehen als nicht allzu leichtes Unterfangen. Die erste Schwierigkeit besteht darin, dass beide Kameras exakt synchronisiert sein müssen. Die Objektive müssen die gleichen Einstellungen im Bereich Fokus, Brennweite und Blende haben. Hinzu kommt noch die synchrone Aufnahme über einen Genlock<sup>137</sup>. Würde es einen Unterschied in den Einstellungen geben, hätte dies eine Abweichung der Halbbilder zur Folge. Das menschliche Gehirn kann zwar die Unterschiede kurzzeitig kompensieren, führt aber verstärkt auch zu einem Ziehen im Auge und Kopfschmerzen bis hin zu Übelkeit beim Betrachter. Wird keine Synchronisierung über den Genlock erfolgen, kann im schlimmsten Falle ein Zeitunterschied von einem halben Frame zwischen den beiden Einzelbildern entstehen. Bei festen Einstellungen ist dies noch zu vernachlässigen, bei Bewegung ist dies aber nicht mehr zu akzeptieren. Es können bei sehr schnellen Bewegungen Höhenfehler entstehen, die wiederum auf Dauer zu Kopfschmerzen und Übelkeit beim Betrachter führen können.<sup>138</sup>

---

<sup>135</sup> gleichzeitige

<sup>136</sup> Vgl. Kemner 1989, S. 12

<sup>137</sup> Als Genlock (generator locking device) wird die Fähigkeit analoger Videosignalquellen bezeichnet, sich in Frequenz und Phase des Bildwechsels von außen synchronisieren zu lassen, sodass zum Beispiel zwei Signalquellen unterbrechungs- und störungsfrei gemischt oder zwischen ihnen umgeschaltet werden kann.

<sup>138</sup> Vgl. Maier 2008c, S. 26

### 3.3.2 Aufnahme

Mit Hilfe einer Aufnahmeapparatur (3D-Rig) können zwei Kameras zueinander in Position gebracht werden. Der Abstand der Objektivmitten, auch Stereobasis genannt, muss je nach Aufnahmeset unterschiedlich gewählt sein. Die Bandbreite reicht hier von ca. 0,5 cm bis 40 cm oder mehr. In den meisten Fällen wird die Stereobasis im Bereich von 6 cm liegen, was auch ungefähr unserem Augenabstand entspricht. Die Stereobasis kann sich in Abhängigkeit von Setparametern ändern. So wird zum Beispiel der Abstand des nächstliegenden Punktes zur Kamera (Nahpunkt) oder der Abstand des am entferntest liegenden Punktes (Fernpunkt) beachtet. Aber auch die Größe des Aufnahmesensors, die Brennweite oder die maximalen Breite der späteren Projektion spielen eine wichtige Rolle. Da die Stereobasis nicht fest bleibt, sondern sich in Abhängigkeit der jeweiligen Randbedingung von Einstellung zu Einstellung ändert, muss der Abstand der Kameras zueinander auch laufend geändert werden.<sup>139</sup>

Grundsätzlich gibt es zwei verschiedene Arten von Rigs. Beim Side-by-Side-Rig werden die Kameras nebeneinander montiert und beim Spiegel-Rig, bei dem die Strahlengänge beider Kameras mit Hilfe eines Strahlenteilers zusammengeführt werden. Technisch recht einfach zu realisieren werden bei Side-by-Side-Rigs die zwei Kameras lediglich nebeneinander auf einer Schiene montiert, optimalerweise zueinander frei verstellbar. Mit dieser Konstruktion können vor allem langbrennweitige Aufnahmen gemacht werden, da das nächstliegende Objekt sehr weit von der Kamera entfernt liegt. Um hier einen guten Raumeindruck zu erhalten wird die Stereobasis in der Regel weit über 15 cm (oft sogar über 40 cm) eingestellt.<sup>140</sup>

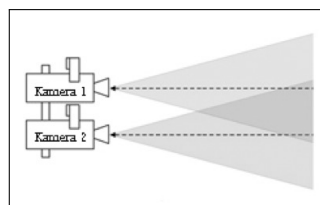


Abb. 13: Prinzip Side-by-Side<sup>141</sup>

Das Grundprinzip eines Spiegel-Rigs besteht darin, dass die Strahlengänge beider Kameras über einen halbdurchlässigen Spiegel überlappend ineinander gefahren werden können (siehe Abbildung 14).

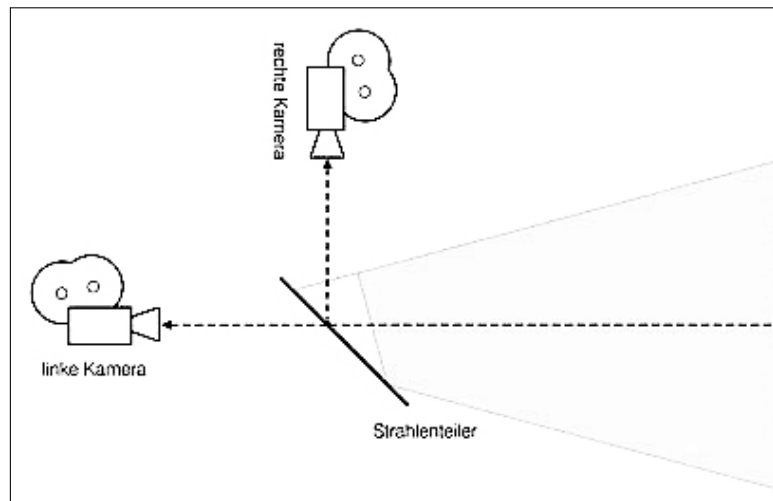
Das einfallende Licht wird über den Strahlenteiler zu gleichen Teilen auf die Kameras aufgeteilt. Dabei wird zwar ein Lichtverlust von über einer Blende in Kauf genommen, aber die Technik erlaubt eine Aufnahme mit sehr geringer Stereobasis. Dies wird nötig,

<sup>139</sup> ebenda

<sup>140</sup> ebenda, S. 27

<sup>141</sup> Maier 2008c, S. 27

<sup>142</sup> Maier 2008c, S. 27

Abb. 14: Prinzip Spiegel-Rig<sup>142</sup>

wenn das 3D-Aufnahmeset eine große Tiefe zwischen einem der Kamera sehr weit entfernten und einem sehr nahe liegenden Aufnahmepunkt aufweist.<sup>143</sup>

Über die technischen, aber auch finanziellen Anforderungen, die ein 3D-Film an ihre Produzenten und Darbieter stellt, wird mitunter gerne vergessen, dass sich aufgrund des Zusatzes einer dreidimensionalen Abbildung mannigfaltige Möglichkeiten bieten. Das wirkliche Potenzial liegt hier nämlich im Raumeffekt. Dieser bezieht den Zuschauer direkt in die Handlung mit ein und ermöglicht ihm den Schritt vom einfachen Betrachter hin zum Erlebenden. Die Illusion der Räumlichkeit ermöglicht eine Unterstreichung der Handlung. Bekannt ist die Methode, Dialoge mit „Schuss und Gegenschuss“-Verfahren zu verfilmen und somit eine Handlungsbasis zwischen Personen aufzubauen.<sup>144</sup> Die Kamera kann nah an eine Handlungsachse heranfahren, so dass sich der Zuschauer Schritt für Schritt dem Schauspieler nähert. So gewinnt der Zuschauer einen tieferen Einblick in die emotionalen Abgründe der Protagonisten und wird mit in die Handlung integriert.

### 3.4 Übertragung

Menschen, die schon mal in den Genuss der dreidimensionalen Wiedergabe, ohne dabei als Hilfsmittel eine Brille benutzen zu müssen, gekommen sind, sind erstaunt über den verblüffenden Effekt, der ihnen geboten wird. Ein zukünftiges Bildübertragungssystem muss also in der Lage sein, dem Zuschauer die Illusion zu vermitteln, dass er sich direkt am Aufnahmeort und damit innerhalb der übertragenen Bildszenerie befindet. Ein erster wichtiger Schritt in diese Richtung wurde mit der Einführung des HDTV<sup>145</sup> getan. Hier kommt es zu einer Großbildwiedergabe mit einer so hohen Auflösung, dass das Bild etwa

<sup>143</sup> ebenda, S. 27 f.

<sup>144</sup> Aulinger 2008, S. 48

<sup>145</sup> High Definition Television - hochauflösendes Fernsehen

aus der Entfernung der Bilddiagonalen bei genügendem Schärfeeindruck angesehen werden kann. Die Berandung des TV-Gerätes wird subjektiv nicht mehr als Begrenzung empfunden.<sup>146</sup> Letztendlich wird aber noch die räumlich wirkende Großbildwiedergabe gefordert. Alle Konsequenzen, die sich hieraus vor allem für die Übertragung und für digitale Signalaufbereitungsverfahren der Wiedergabe- und Aufnahmeseite ergeben, müssen durchdacht werden. Schon Gerhard Kemner machte 1989 in seinem Buch „Stereoskopie, Technik, Wissenschaft, Kunst und Hobby“ darauf aufmerksam:

*„Dabei werden alle Verfahren, die eine Spezialbrille oder ähnliche Hilfsmittel beim Betrachter erforderlich machen, auf die Dauer für den vorgesehenen Zweck nicht akzeptiert werden. Es muss deshalb das Ziel entsprechender Forschungen sein, ein System zur Übertragung räumlicher Bilder zu finden, das folgenden Randbedingungen genügt [...]“<sup>147</sup>*

Zu den Randbedingungen zählt er vier wichtige Punkte. Als erstes, wie bereits schon erwähnt, die Wiedergabe muss ohne Spezialbrille bzw. ähnlichen Hilfsmittel erfolgen. Die zweite Randbedingung, die Großbildwiedergabe mit großem Gesichtsfeldwinkel (z.B. von Personen in natürlicher Größe), wird jetzt schon durch das HDTV erfüllt. Der dritte Punkt ist, dass der Bildeindruck keine bestimmte Betrachterposition erfordert und insbesondere sollte er für mehrere Zuschauer gleichzeitig gegeben sein. So sollten beim Standortwechsel neue Perspektiven oder verdeckte Rauminhalte sichtbar werden. Die vierte und letzte Randbedingung ist die Übertragung von Farbe und der Bewegung, sowie die Wiedergabe eines unendlich entfernten Hintergrundes am Aufnahmeort.<sup>148</sup>

Da aber im hochauflösenden Farbsystem die Datenfülle noch einmal drastisch steigt, sind wiederum Verfahren zur Datenmengenreduktion erforderlich. Auch hierfür erwähnt Börner drei wichtige Aufgabenbereiche.<sup>149</sup> Erstens, die Realisierung einer prozessorgesteuerten mehrkanaligen Farbkameraeinheit. Zweitens, die Kanalzahlverringering, eventuell durch entsprechende Zusatzvorrichtungen von Prismen und/oder Spiegelsystemen, die vor den Objektiven der Kamera angebracht werden. Der dritte Punkt ist die Projektionseinheit. Hier könnte ein Lichtventil<sup>150</sup> auf Festkörperbasis für eine vielkanalige Projektionseinheit ein Lösungsweg sein.

Um die Daten größtmöglichst zu reduzieren, werden zusätzlich zum vollständigen Signal nur noch jene Bildpunkte übertragen, die eine stereoskopische Differenz ausmachen (siehe Abbildung 15). Und da sich zwei benachbarte Stereoperspektiven nur geringfügig

<sup>146</sup> Börner 1989, S. 79

<sup>147</sup> Börner 1989, S. 79

<sup>148</sup> ebenda

<sup>149</sup> ebenda, S. 86

<sup>150</sup> Das Licht der Lampe in einem Projektor wird über sogenannte dichroitische Spiegel in seine Komponenten rot, grün und blau zerlegt. Jeder Farbanteil wird dann über Umlenkspiegel auf eine eigenes Display gelenkt, welches nur die für den Bildinhalt notwendigen Bildpunkte in ihrer jeweiligen Intensität durchlässt.

vom Bildinhalt her unterscheiden, können die Zwischenbilder auch erst am Empfängerort synthetisiert werden, so dass die Datenrate auf dem Übertragungsweg ebenfalls reduziert werden kann.<sup>151</sup>

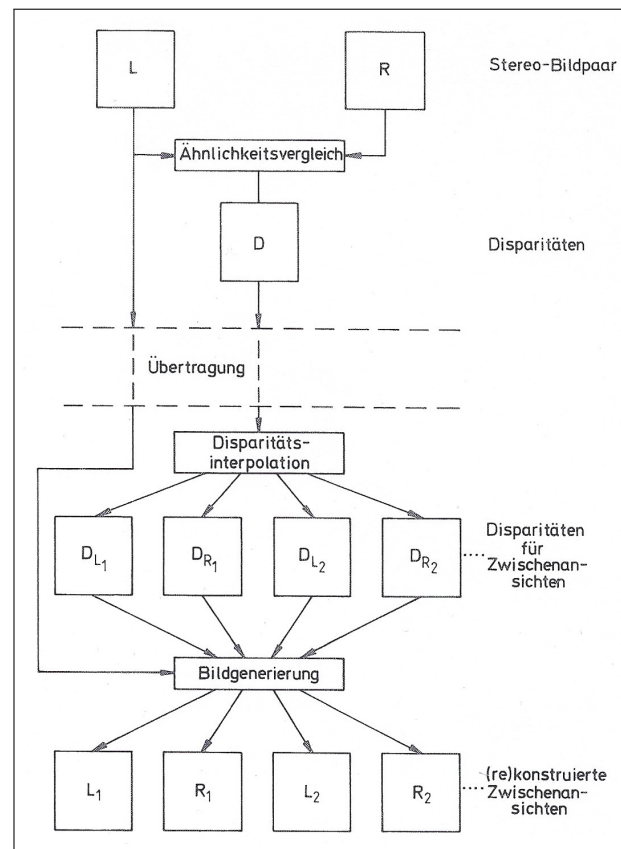


Abb. 15: Prinzip der Übertragung bzw. Konstruktion von Stereo-Ansichten<sup>152</sup>

Bereits mit dem Aufkommen vom Farbfernsehen wurden stereoskopische Inhalte anaglyph gesendet. Dazu wurde das Videosignal einmal vom roten Farbanteil und einmal vom blauen Farbanteil befreit und wieder übereinander gelegt. Eine andere Möglichkeit ist das Übertragen der zwei Videosignale in getrennten Videostreams oder in einem Videostream aufgeteilt nach Halbbildern. Die Farben bleiben dadurch erhalten und es gibt die Möglichkeit nur ein Videosignal anzeigen zu lassen. Somit bleibt das gewohnte 2D-Bild übrig und es kann auf einem normalen Fernsehgerät vernünftig angezeigt werden.<sup>153</sup> Eine HD-taugliche 3D-TV-Variante mit zwei anamorph<sup>154</sup> komprimierten Videostreams in einem HD-Kanal nennt sich „side-by-side“ (nebeneinander). Das 3D-TV-Gerät entzerzt die jeweiligen Halbbilder in das volle 16:9-Format und stellt es überlagernd mit einer 100 bzw. 120 Hz Bildwechselfrequenz dar.<sup>155</sup>

<sup>151</sup> Vgl. Börner 1989, S. 86

<sup>152</sup> Kost 1988, S. 68, Bild 3

<sup>153</sup> Vgl. ebenda

<sup>154</sup> Der Begriff anamorph (griechisch: ana = herauf, auf; morphea = Form, Gestalt) bezeichnet die Eigenschaft einer optischen Abbildung, die mit einer Zylinderlinse oder einem Zylinderspiegel erzeugt wird. So entsteht ein Bild, das auf einer Achse verzerrt ist. Ein anamorphes Bild ist in der Breite gestaucht und in der Höhe unverändert.

<sup>155</sup> Vgl. Kost 1988, S. 69 f.



## 4 Integral Fotografie in 3D-TV Systemen

### 4.1 Einleitung

Die derzeitige Fotografie, sei es als Foto oder Film, zeigt nur einen Aspekt der Realität; es reduziert sich auf ein einziges Bild fixiert auf einer Ebene, ähnlich wie bei der Malerei oder einem handgezeichneten Bild. Der direkte Blick auf die Wirklichkeit bietet uns aber unendlich viel mehr Vielfalt. Wir sehen Objekte im Raum, in ihrer wahren Größe und Tiefe, nicht nur auf einer Ebene. Außerdem ändert sich ihre Erscheinung, abhängig von der Position des Betrachters. Die Gegenstände in verschiedenen Tiefen bewegen sich relativ zueinander. Wird die Perspektive verändert, treten neue Teile ins Bild, die vorher von anderen Objekten verdeckt waren. Der Betrachter schaut wie durch ein Fenster auf die äußere Welt und kann verschiedene Teile der Landschaft sukzessiv<sup>156</sup> durch diese Öffnung betrachten.

Als Gabriel Lippmann den Nobelpreis in Physik für seine Lippmann-Fotografie (Interferenz-Fotografie<sup>157</sup>) erhielt, erschien in „*Comptes Rendus Hebdomadaires des Séances de L'Académie des Sciences*“ sein Aufsatz mit dem Titel: „*Épreuves réversibles. Photographies intégrales*“. In dieser Schrift konzipiert Lippmann einen eigenständigen Typus des transplanen Bildes<sup>158</sup>: die Integrale Fotografie.<sup>159</sup>

Die Idee, die hinter dem Typus steckt, hat auf den ersten Blick nichts mit seiner Interferenz-Fotografie zu tun. Lippmann schlägt vor, ein Raster oder Netz aus winzigen Linsen auf eine lichtempfindliche Schicht aufzubringen. Der aufzunehmende Gegenstand wird dann vor die präparierte Platte gebracht und belichtet. Es wird nun nicht mehr ein Makrobild auf eine Fläche projiziert, sondern, aufgrund der Anzahl winziger Linsen, ein Netzwerk von Mikrobildern. Für die Betrachtung wird die Platte wiederum von hinten beleuchtet und durch das gleiche Netzwerk von Linsen betrachtet. Statt der einzelnen Mikrobilder erscheint nun ein dreidimensionales, reelles Bild, das zwischen der Platte und dem Betrachter zu schweben scheint.<sup>160</sup>

<sup>156</sup> allmählich, langsam

<sup>157</sup> Das Verfahren von Lippmann ist ein Herstellungsverfahren für Farbbilder in der Fotografie. Ein extrem feinkörniger Schwarzweißfilm wird mit der Schichtseite auf Quecksilber gelegt und belichtet. Es bilden sich Interferenzen zwischen dem einfallenden und reflektierten Licht, die entsprechende Schwärzungen im Volumen der lichtempfindlichen Schicht bewirken. Nach normaler Entwicklung kann das Bild erneut auf Quecksilber gelegt werden und es erscheinen Interferenzfarben, ähnlich wie bei Seifenblasen.

<sup>158</sup> Räumlichkeitsbild

<sup>159</sup> Schröter 2009, S. 144

<sup>160</sup> Vgl. ebenda, S. 146

## 4.2 Funktionsweise

Die Integrale Fotografie basiert auf Techniken der Fotografie und wird zur gleichen Bildwiedergabe wie die Holographie eingestuft. Beide geben ein dreidimensionales Bild wieder, da sie den Wellencharakter des Lichtes ausnutzen und eine anschauliche Darstellung erzielen, identisch zu dem natürlichen Bild hinter der Linse oder Blende. Diese Methode erzeugt somit autostereoskopische 3D-Bilder, die zur Betrachtung keine speziellen Hilfsmittel benötigen. Es erleichtert auch die kontinuierliche Sicht in horizontaler und vertikaler Richtung, ohne dass das Bild, wie bei der Lentikular- oder Rastertechnik, kippt.

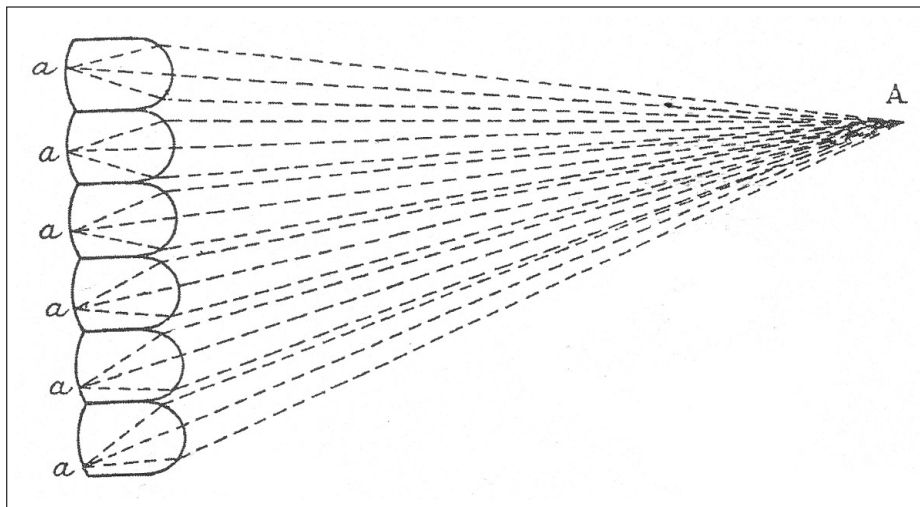


Abb. 16: Schema der Integralen Fotografie<sup>161</sup>

Abbildung 16 zeigt das Prinzip der einfachen Methode der Integralen Fotografie, wie sie von Lippmann in einer weiteren Schrift 1908 vorgestellt wurde. Lichtstrahlenbündel, die von einem Objektpunkt A ausgehen, werden durch jede der Mikrolinsen zu einem Bildpunkt a fokussiert. Beleuchtet man das ganze nun von hinten, wird das von jedem Bildpunkt a ausgehende Strahlenbündel durch die Linse im Punkt A zur Konvergenz gebracht. Das gilt genau so für jeden der verschiedenen Punkte  $a_1, \dots, a_n$ , die durch je eine Linse von A erzeugt werden und natürlich auch für jeden Objektpunkt B, C, D bis n.<sup>162</sup>

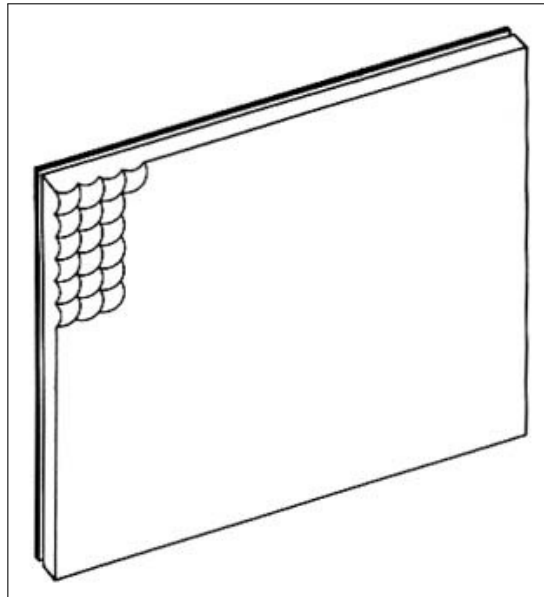
Das integrale Bild selbst besteht dabei aus einer großen Anzahl dicht aneinander liegender individueller Mikrobilder, die jedes für sich das Gesamtbild aus der jeweiligen Perspektive abbildet. Der Betrachter schaut auf das Stereobild durch eine Anordnung von sphärischen und konvexen Linsen (siehe Abbildung 17). Diese spezielle Art von Linsensammlung wird in der Fachsprache auch als Fly's Eye<sup>163</sup> bezeichnet.

Die Anordnung der Mikrolinsen befindet sich vor einer lichtempfindlichen Schicht, der

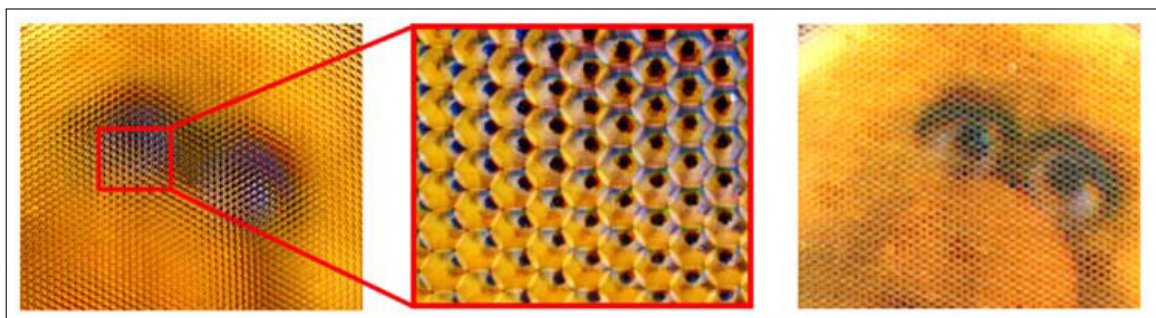
<sup>161</sup> Lippmann 1908, S. 823

<sup>162</sup> Vgl. Lippmann 1908, S. 821 ff.

<sup>163</sup> Fliegenauge / Facettenauge

Abb. 17: Abbildung einer Facettenauge-Linsenplatte<sup>164</sup>

Fotoemulsion oder dem Film. Zahlreiche kleine Bilder des fotografierten Gegenstandes, gleich zu der Anzahl der Linsen die benutzt werden, werden auf diesen Film projiziert. Der Gegenstand wird aus vielen verschiedenen Winkeln, die sich jeweils nur geringfügig unterscheiden, aufgenommen. Jedes Einzelbild unterscheidet sich somit leicht von seinem benachbarten Bild, doch genau diese kleinen Unterschiede beinhalten die 3D-Informationen. Der Film wird dann als eine transparente Fotografie (Diapositivfilm) entwickelt und zur Wiedergabe genau dort platziert, wo sich vorher der Film, der das Objekt erfasste, befand. Danach wird die Fotografie mit hellen Licht von hinten bestrahlt. Die Lichtstrahlen wandern nun den gleichen Weg, den sie schon bei der Aufnahme gingen, zurück und erzeugen genau an der Stelle, wo sich vorher der aufgenommene Gegenstand befand, ein räumliches Bild.

Abb. 18: Integralbild (links) ohne Linsenbetrachtung; Vergrößerung (Mitte), jede Linse besitzt sein eigenes spezifisches Bild; Integralbild (rechts) aufgenommen durch die passende Linse von einer bestimmten Position aus.<sup>165</sup>

Wird diese Methode richtig angewendet, ist das Ergebnis ein überwältigendes dreidimensionales Bild, dessen Realismus nur noch mit einem Hologramm verglichen werden

<sup>164</sup> Roberts & Villums 1989

<sup>165</sup> ebenda

kann. Der Wellencharakter ermöglicht es, dass die Augen zwischen Objekten im Vorder- und im Hintergrund akkommodieren (fokussieren) können. Zu dem Effekt der Räumlichkeit können außerdem noch ausgeklügelte Animationseffekte im Integralbild erzielt werden.<sup>166</sup> Der Ausdruck „Integral“ kommt dabei von der Integration aller Mikrobilder durch die Linsenansammlung zu einem kompletten dreidimensionalen Bild. Ein einzelnes integrales Pixel (also das Mikrobild mit davor gelegter Linse) gibt dem Betrachter nur einen winzigen Ausschnitt des Gesamtbildes wieder und ändert diesen bei der kleinsten Bewegung des Betrachters. Die Linse vor dem Mikrobild fokussiert von jedem Betrachtungswinkel aus auf einen anderen Punkt. Das Integralbild basiert auf den Prinzipien der Linsenaustastung. Um diesen Effekt zu erzielen, wird die Stärke der Linsenansammlung so gewählt, dass parallel eintreffende Lichtstrahlen auf die entgegengesetzte Seite der Anordnung, die üblicherweise flach ist, fokussieren (siehe Abbildung 19).

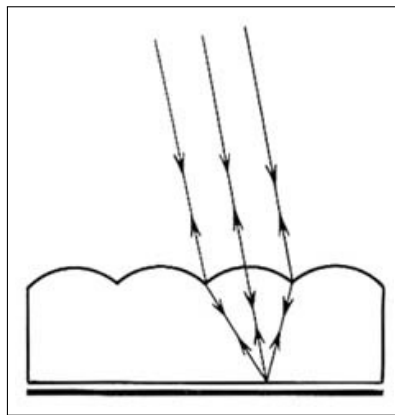


Abb. 19: Abtastungseffekt<sup>167</sup>

Diese flache Seite wird auch Brennpunktebene genannt. Es ist die Ebene, auf die die Mikrobilder platziert sind. Jedes für eine eigene Linse, Seite an Seite. Da jede Linse genau auf einen Punkt des Mikrobildes fokussiert, kann der Betrachter niemals gleichzeitig auf zwei Punkte innerhalb des Mikrobildes schauen. Der betrachtete Punkt ist abhängig von dem Winkel von wo aus der Betrachter auf das Bild schaut. Als Beispiel zeigt hier die Abbildung 20 eine Ansammlung von kleinen weißen Punkten auf schwarzem Hintergrund, welcher sich hinter jeder Linse auf der Brennpunktebene befindet. Jede Linse erscheint nun entweder vollständig schwarz oder weiß, abhängig davon, ob man den weißen Punkt oder den schwarzen Hintergrund fokussiert.<sup>168</sup>

<sup>166</sup> siehe Page, 07/2011, S. 11

<sup>167</sup> Okoshi 1976

<sup>168</sup> Roberts, S. 2

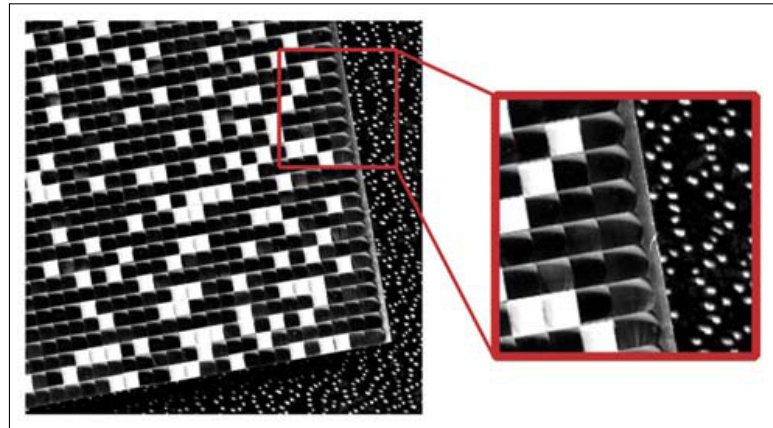


Abb. 20: Beispieeffekt der Facettenaugenlinse auf einem mit weißen Punkten auf schwarzen Hintergrund bedruckten Bild.<sup>169</sup>

### 4.3 Geschichte

In den Anfangsjahren der Integral Fotografie waren die Linsenelemente noch nicht vorhanden. Erst zur Zeit des Zweiten Weltkrieges gab es kostengünstiges und formbares Plastik. Es wurden daraufhin auch neue Verfahren zur Formung der Plastik entwickelt. Bis dahin nutzte man zur Forschung eine Ansammlung von optischen und damit analogen Lochblenden. Eigentlich ist die Blende der Lochkamera<sup>170</sup> auch eine Linse, aber Linsen basieren im allgemeinen auf Beugung als auf Brechung des Lichtes. Die Lochkamera ist im Grunde genommen ein kleines Loch in einer lichtundurchlässigen Zelle. In der Fotografie wird der Radius des Loches so gewählt, dass auf dem Film ein auf genau einen Punkt ausgerichtetes und gut verteiltes Bild entsteht. Die Wellenlänge des Lichtes bildet die untere Grenze für den Lochdurchmesser. Der Brennpunkt ist somit ungefähr die Wellenlänge des Lichtes geteilt durch das Quadrat des Radius des Loches.<sup>171</sup> Um aber eine Lochkamera als Betrachtungsschirm zu benutzen, muss der Lochdurchmesser viel größer sein, damit genügend Licht durch die Ansammlung strahlen kann. Allerdings muss die Blende, um das Integralbild genau betrachten zu können, 10 Prozent oder weniger kleiner sein, was aber ein sehr dunkles Bild zur Folge hätte, auch wenn ein sehr helles Licht als Hintergrundbeleuchtung benutzt wird. Die erste Methode des integralen Bildes war die Integral Fotografie. Sie wurde am 3. März 1908 vom Professor für Physik

<sup>169</sup> Roberts, S. 3

<sup>170</sup> Die Lochkamera ist ein einfaches Gerät, um optische Abbildungen zu erzeugen. Sie benötigt dafür keine optische Linse, sondern nur eine dunkle Zelle, mit einer kleinen, verschließbaren Öffnung. Das auf der gegenüberliegenden Innenseite entstehende reelle Bild lässt sich auf lichtempfindlichem Material festhalten. Das Prinzip der Lochkamera besteht in der Abbildung leuchtender oder beleuchteter Gegenstände dadurch, dass durch die Lochblende nahezu alle Lichtstrahlen, bis auf ein möglichst kleines Bündel in gerader Verbindung zwischen Objekt- und Bildpunkt, ausgeblendet werden. Der kleine Durchmesser der Blende bestimmt die Bildschärfe. Mathematisch ist das Bild das Ergebnis einer Faltung aus idealer Abbildung des Gegenstandes mit der Fläche der Lochblende. In den physikalischen Grenzen der Strahlenoptik erzeugt ein unendlich kleines Loch eine unendlich scharfe Abbildung, die jedoch unendlich lichtschwach ist.

<sup>171</sup> Vgl. Schmidt-Ploch 2001, S. 21ff.

Gabriel Lippmann<sup>172</sup> vor der französischen Wissenschaftsakademie unter dem Titel „*La Photographie Integral*“<sup>173</sup> vorgestellt.

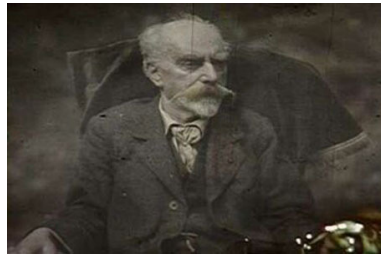


Abb. 21: Professor Gabriel M. Lippmann. Selbstporträt mit Verwendung seines Farbfotografieverfahrens.<sup>174</sup>

Er schlug eine Methode zur Aufnahme eines komplett räumlich wirkenden Bildes, mit einer Parallaxe in allen Richtungen, fixiert auf eine fotografische Platte, vor. Das Bild sollte mit Hilfe einer Ansammlung von kleinen kugelförmigen konvexen Linsen, mit einer einzigen Belichtung, aufgenommen werden. Mit seinem Denkansatz, später bekannt als die direkte Methode, wird ein Gegenstand oder eine Szene direkt vor der Linse aufgenommen. Lippmann schlug dieses Verfahren vor, ohne es jemals an Hand eines Experimentes getestet zu haben. In einem zweiten Papier von 1908<sup>175</sup> beschreibt er einen groben Versuch mit einer Bildfläche aus zusammengesetzten Glasstäben, die ein kugelförmiges Ende besaßen. Lippmann beschreibt aber nur einen stark beschränkten Erfolg. In einem späteren Papier von 1912<sup>176</sup> beschreibt er einen Test mit einer Ansammlung von 12 kleinen Linsen, montiert in einem dreieckigen Rahmen. Er schreibt:

*„bei Beleuchtung der Platte sieht man nicht mehr individuelle mikroskopische Bilder; diese wurden durch ein einzelnes (integrales) Bild ersetzt, was man unter den gleichen Winkeln wie das originale Objekt sieht.“*<sup>177</sup>

Er erwähnte weiter, dass das wiedergegebene Bild die Form ändert, genau wie das originale Objekt, abhängig von der Position des Betrachters und sich auch die Winkel-Dimensionen mit der Entfernung verändern.

Das erste Verfahren, dass die Lippmann Methode überprüfte, wurde von Professor A.

<sup>172</sup> Professor Gabriel Lippmann war bis dahin bekannt durch seine erste Farbfotografie 1886 (siehe Abbildung 21). Es wird hier ein extrem feinkörniger Schwarzweißfilm mit der Schichtseite auf Quecksilber gelegt und belichtet. Es bilden sich Interferenzen zwischen dem einfallenden und reflektierenden Licht, die entsprechende Schwärzungen im Volumen der lichtempfindlichen Schicht bewirken. Nach normaler Entwicklung kann das Bild erneut auf Quecksilber gelegt werden und es erscheinen Interferenzfarben, ähnlich wie bei Seifenblasen. Für diese Erfindung bekam er 1908 den Nobelpreis in Physik und die Methode wurde paradoxerweise als erste holographische Methode bezeichnet.

<sup>173</sup> Lippmann 1908a

<sup>174</sup> Roberts, S. 4

<sup>175</sup> Lippmann 1908b

<sup>176</sup> Lippmann 1911

<sup>177</sup> ebenda

P. Sokolov von der Moskauer Universität 1911<sup>178</sup> durchgeführt. Er benutzte hierfür das System der Lochkamera. Obwohl dieses Verfahren ein relativ dunkles Bild hervorbrachte, war das Experiment erfolgreich und zeigte den Leuchtdraht einer Glühbirne, der über der Bildfläche zu schweben schien. Sokolov lieferte eine detaillierte mathematische und experimentelle Beschreibung der Lippmann Methode und war damit der Erste, der die ideale Form der Rückseite der Linseneinheit errechnete. Er bewies, dass die Integrale Fotografie,

*„aufgenommen ohne eine optische Linse, bei der direkten Prüfung, einen Eindruck von Tiefencharakteristik einer stereoskopischen Fotografie gibt. Die Integrale Fotografie gibt nicht nur die komplette Tiefe wieder, sondern auch eine Perspektive, die vom Betrachtungswinkel auf das Foto variiert und damit eine Annäherung an die Realität gibt, die bis jetzt unerreichbar mit anderen Geräten ist.“<sup>179</sup>*

Der französische Estanave wiederholt das Experiment 1930, ebenfalls mit der Abbildung des Glühfadens einer Glühbirne. Er arbeitete mit einer Einheit von 56 und 95 Stanhopelinsen<sup>180</sup>. Später benutzte er gar ein Instrument mit 1250 Blenden, dass er „Stenopic-Camera“ nannte.<sup>181</sup>

Die direkte Methode des Lippmann Verfahrens hatte aber auch ihre Einschränkungen. Als erstes konnten nur Gegenstände wiedergegeben werden, die sich direkt vor der Linseneinheit befanden. Anders gesagt, schienen nur Gegenstände vor der Linseneinheit, aber nicht innerhalb oder dahinter, zu schweben. Außerdem, aufgrund der Tiefeneinschränkung der einzelnen Linsen, konnte der Gegenstand nur innerhalb eines bestimmten Bereiches vor der Linse positioniert werden und damit wurden Gegenstände auch nur richtig wiedergegeben, wenn sie sich nur wenige Zentimeter vor der Linseneinheit befanden. Herbert E. Ives verbesserte später diese Technik 1930, indem er eine Linse mit größerer Blende (eine Linse mit einem größeren Durchmesser als der Augenabstand beider Augen) benutzte, die das schwebende Bild so verschob, dass es vor, innerhalb und hinter der Linseneinheit wahrgenommen werden konnte. Später bekannt als die indirekte Methode, die die Tiefenverhältnisse erheblich vergrößerte. Zum ersten Mal gelang es damit, dass der Gegenstand vor und hinter der Linseneinheit zu schweben schien. Ives schlug außerdem vor, größere konkave Spiegel als Alternative zu den optischen Linsen zu benutzen.<sup>182</sup>

Der größte Nachteil der Lippmann Methode war, dass die aufgenommenen Bilder pseudoskopisch erschienen, d.h. die Tiefenhinweise wurden vertauscht. Der Vordergrund wurde Hintergrund und umgekehrt. Interessanterweise bemerkte Lippmann selber dieses

---

<sup>178</sup> Sokolov 1911

<sup>179</sup> ebenda

<sup>180</sup> Stanhopelinsen sind ein optisches Gerät, das es ermöglicht Mikrofotografien ohne Verwendung eines Mikroskopes zu betrachten, d.h. eine Art Vergrößerungsglas

<sup>181</sup> Dudnikov 1970

<sup>182</sup> Vgl. Roberts, S. 5

Problem nicht, da er es nie erwähnte<sup>183</sup>. Erst 1931 nahm Herbert E. Ives dieses Problem wahr.<sup>184</sup> Er schlug zur Beseitigung dieses Problems eine zweite Belichtung vor, die die Tiefenwirkung wieder umkehren sollte. Bekannt als die „Doppelschritt“-Methode, ermöglicht die zweite Belichtung der originalen Platte durch eine weitere Linseneinheit die Umkehrung des Effektes. Er demonstrierte diese Lösung indem er eine weitere Lochkamera benutzte.

Das erste Experiment, dass eine einwandfreie Linseneinheit benutzte, wurde offenbar von S. P. Ivanov und L. V. Akimakina aus der Sowjetunion 1948 vorgestellt.<sup>185</sup> Die Linseneinheit wurde mit einer Anzahl von 2 Millionen Linsen angegeben. Die Linsen hatten einen Durchmesser von 0,3 Millimeter (85 Linsen pro Zoll) und eine Brennweite von 0,5 Millimeter (0,02 Zoll). Damit ergab sich eine Linseneinheit von circa 42 Zentimeter (17 Zoll) zum Quadrat.

Ein Hauptaugenmerk der Indirekten Methode, welche oft aus mehreren optischen Teilen besteht, ist, dass die Lage des in der Luft erscheinenden „realen“ Bildes geändert werden kann. Entweder durch das Anpassen der Lage des Gegenstandes, durch Anpassen der Stellung der Optik oder durch Anpassen der Lage der Linseneinheit innerhalb der Brennebene der Kamera. Mit anderen Worten, Gegenstände können vor, auf oder hinter der Linseneinheit „schweben“. Unter bestimmten Aspekten auch in einer Kombination aller, einfach durch eine präzise Ausrichtung. Bedauerlicherweise sind einige Formen der kugelförmigen Verzerrung von Artefakte üblich aufgrund der Beschaffenheit von einer relativ großen Blende, Weitwinkel, Hauptlinse oder konkaven Spiegel. Zusätzlich sind die Kameras nur fähig kleine Gegenstände aufzunehmen.<sup>186</sup>

Die erste Methode zur Darstellung von Integralbildern wurde 1968 von A. Chutjian und R. J. Collier<sup>187</sup> in der Bell Forschungseinheit vorgestellt. Die Methode zeigte ein berechnetes, computer-generiertes, pseudoskopisches Bild in der Linseneinheit, welches selbstverständlich wieder umgekehrt wurde, damit es orthoskopisch<sup>188</sup> richtig abgebildet wurde. Das Ergebnis war ein voll-volumetrisches, computer-generiertes Bild. Das Bild wurde durch die integrale Linseneinheit auf eine lichtempfindliche Schicht aufgenommen und war somit nicht nur das erste Bild in der Stufenmethode, es war ebenfalls die erste Methode, die ein computer-generiertes integrales Bild erzeugte und die erste Methode, die einen Röhrenbildschirm oder eine transparente Maske benutzte, um ein nicht-existierendes Objekt zu simulieren (siehe Abbildung 22).

---

<sup>183</sup> ebenda, S. 10

<sup>184</sup> Ives 1931, S. 171 ff.

<sup>185</sup> Valyus 1966

<sup>186</sup> Roberts, S. 9

<sup>187</sup> Chutjian, Collier 1968

<sup>188</sup> raumrichtige Wiedergabe



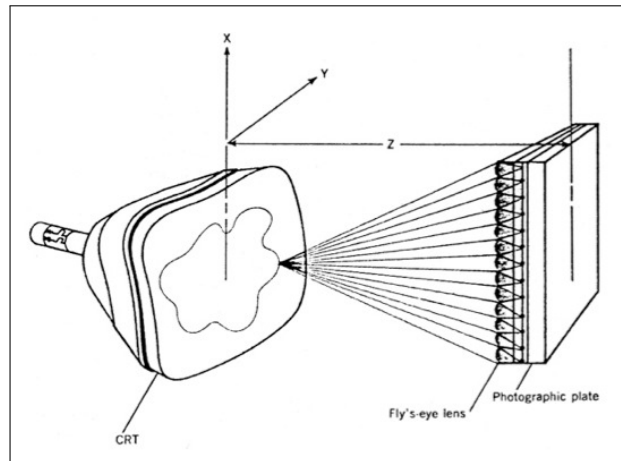


Abb. 22: Simulation von nicht-existierenden Objekten mit Hilfe eines Röhrenbildschirmes.<sup>189</sup>

Forscher entwickelten die Methoden der Integralen Fotografie in den sechziger und siebziger Jahren weiter. Am bedeutendsten war hier Roger de Montebello, der über 100 bemerkenswerte Bilder produzierte und hierfür sein patentiertes Ingram-System (siehe Abbildung 23) benutzte.

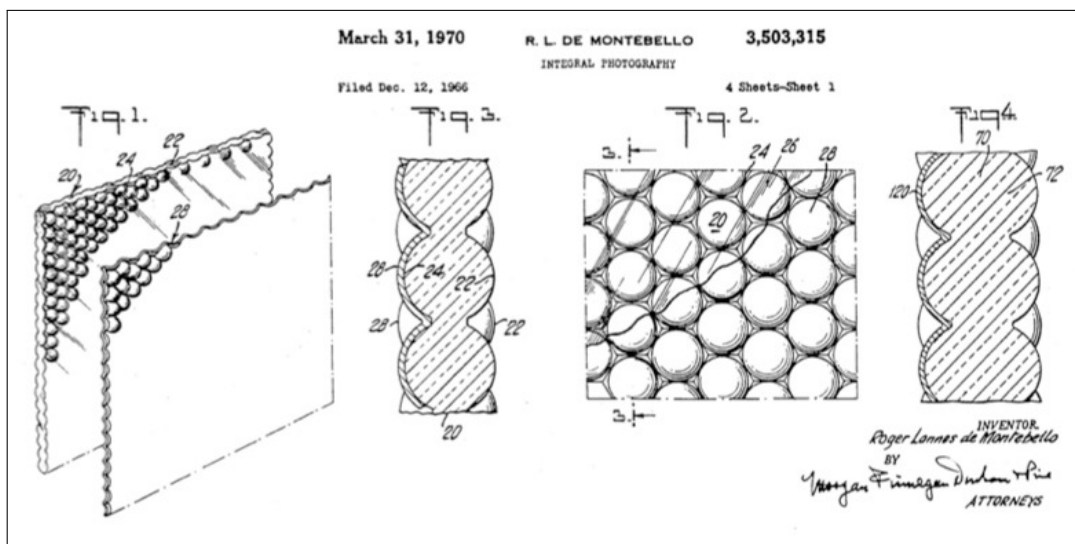


Abb. 23: Ingram Methode, U.S. Patent 3.503.315<sup>190</sup>

Er war der erste, der seine Technologie der Allgemeinheit durch seine Firma MDH Products of Ann Arbor, Michigan, USA, zugänglich machte. Sein Verfahren beinhaltete eine hohe Anzahl von dicht aneinander grenzenden Linsensets, verpackt in einem fast quadratischen oder vorzugsweise in einem sechseckigen Format, geformt aus transparenten, formbarer Plastik 1971.<sup>191</sup>

Bis 1970 ist es immer noch schwierig Linseneinheiten herzustellen. Des weiteren fehlt die Verbreitung der Methode zum kommerziellen Zwecke und somit steigen die Kosten

<sup>189</sup> Collier 1968

<sup>190</sup> de Montebello, 1970

<sup>191</sup> de Montebello, 1971



Abb. 24: Zwei Ansichten einer 30x35 cm großen Ingram-Fotografie<sup>192</sup>

in unerschwingliche Bereiche. Eine elegante Lösung, ohne hohen finanziellen Aufwand, ist die Benutzung von dünnen Glasperlen, mit einem Durchmesser von 50 Mikrometer, eingebettet in Fotoemulsion. Der erste, der diese Konzept vorschlug, war John Alofs von Grand Rapid Michigan 1970.<sup>193</sup> 1987 verfolgte auch 3M diesen Bereich der Forschung um einen Animationseffekt mit Hilfe der Glasperlen zu erzeugen<sup>194</sup> und so einen animierten Effekt auf einer gewölbten Oberfläche zu schaffen.<sup>195</sup>

2001 entwickelte 3M eine Methode, die einen perlenbesetzten Bildschirm zur Erzeugung von „schwebenden“ virtuellen Gegenständen benutzt.<sup>196</sup> Bei dieser Methode wird die Hauptlinse oder der Linse Bildschirm entlang der z-Achse bewegt und dies bewirkt die Entstehung eines voll-volumetrischen Bildes.

Ein großer Nachteil bei der Benutzung von Glasperlen ist der Brennpunkt. Der Brennpunkt einer Kugel liegt sehr weit hinter der Oberfläche der Rückseite, was bedeutete dass das Bild, welches erzeugt wird, nicht scharf und detailliert abgebildet werden konnte, wie es bei der Benutzung von Linsen, die auf einer flachen Rückwand (Plano-convexe Linse) das Bild abbilden, möglich war. Außerdem ist eine einfache runde Form keine optimale Linsenform. In den ersten Tagen, waren Plano-convexe Linsen sowohl für die Integrale Fotografie als auch für die Lentikulartechnik stärker eingeschränkt als runde Linsenformen. Die Benutzung einer solchen Linsenform für die Aufnahme und Wiedergabe ist aufgrund von Verzerrungen bei runden Abweichungen sehr stark eingeschränkt. Astigmatismus<sup>197</sup> und Strahlenringe sind unausweichlich. Dies wird schon in Snell's Gesetz der Brechung beschrieben. Optiker kannten die Leistungsverbesserung, die durch nicht-spherische Oberflächen möglich war. Die meisten Lentikulartechniken haben eingebaute nicht-spherische Korrekturen seit den 80igern.

<sup>192</sup> Roberts, S. 10

<sup>193</sup> Alofs, 1970

<sup>194</sup> Orenstein, 1987

<sup>195</sup> Bradshaw, 1987

<sup>196</sup> Florczak, 2001

<sup>197</sup> Astigmatismus ist ein Schärfefehler, welcher das von einem Objektpunkt ausgehende und schräg einfallende Strahlenbündel betrifft.

Eine Gruppe von Forschern von der University of Sheffield startete 1988 ebenfalls die Prozessforschung der Integralen Fotografie und tut dies noch bis heute.<sup>198</sup> Zu ihnen gehören Neil Davis, Malcolm McCormick, Mike Hutley und Li Yang.<sup>199</sup> Sie haben mehr Arbeit in den letzten 15 Jahren geleistet, als eine andere Gruppe inklusive der Entwicklung von einer Anzahl von eleganten, pseudoskopischen Umkehrungsmethoden und zurückstrahlenden Lösungen, neuen Kamera- und Linsendesign, computer-generierten Bildern und verschiedene Methoden der Bildwiedergabe. Sie forschen derzeit in der De Montfort University in Leicester unter dem Namen Imaging Technology Group<sup>200</sup>.

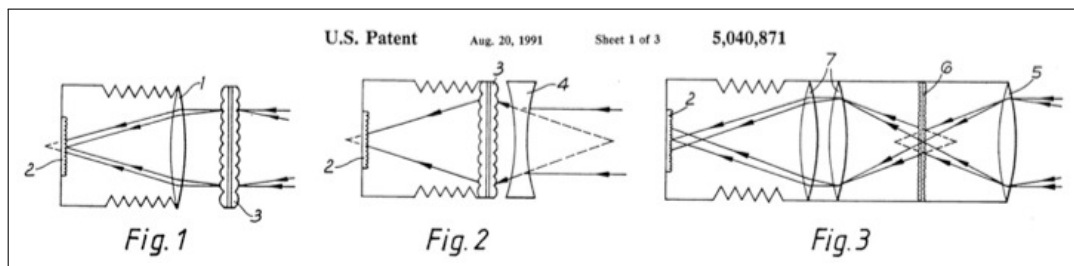


Abb. 25: Skizze zur Umkehrung des pseudoskopischen Bildes, U.S. Patent 5.040.871<sup>201</sup>

Viele tausende experimentelle Bilder, mit einer Vielzahl von Methoden, wurden während des letzten Jahrhunderts hergestellt, sei es zur Darstellung von 3D-, Animations- oder anderen eindrucksvollen Effekten. Die Forschung und die Kommerzialisierung der Integralen Fotografie ist weiterhin sehr aktiv, inklusive der Arbeit im Integralen Fernsehen und anderen elektronischen Displays. Obwohl das integrale Bild noch keinen signifikanten kommerziellen Erfolg erzielt hat, ist seine bevorstehende weit verbreitende Verwendung unvermeidlich.

## 4.4 Probleme und deren Behebung

Wie in der Einleitung der Arbeit schon erwähnt, gibt es für die einfache Ausführung der Integral Fotografie (siehe Abbildung 26) vier grundlegende Probleme:

1. mit der direkten Methode erscheint ein pseudoskopisches Bild
2. es gibt optische Überschneidungen der einzelnen Bildelemente
3. Gegenstände, die sich bei der Reproduzierung weiter weg befinden, haben eine andere Auflösung als Objekte, die sich unmittelbar, unter den gleichen Bedingungen, vor oder hinter der Linseneinheit befinden
4. die Schwierigkeit zur Realisierung der Aufnahme und Wiedergabe in Echtzeit

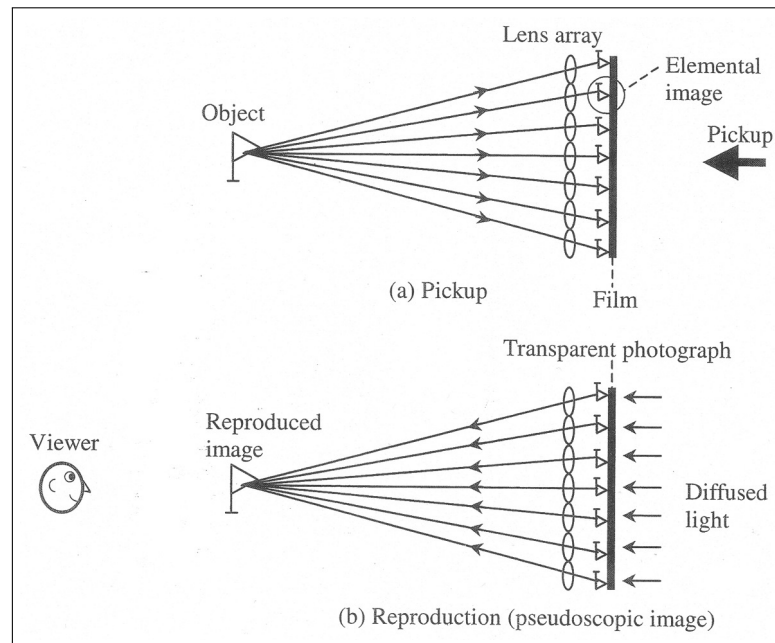
<sup>198</sup> siehe Image Engineering Laboratory unter <http://www.shef.ac.uk/eee/research/iel/index.html>

<sup>199</sup> Vgl. Yang 1988

<sup>200</sup> Im Internet unter: <http://itg.beckman.illinois.edu/>

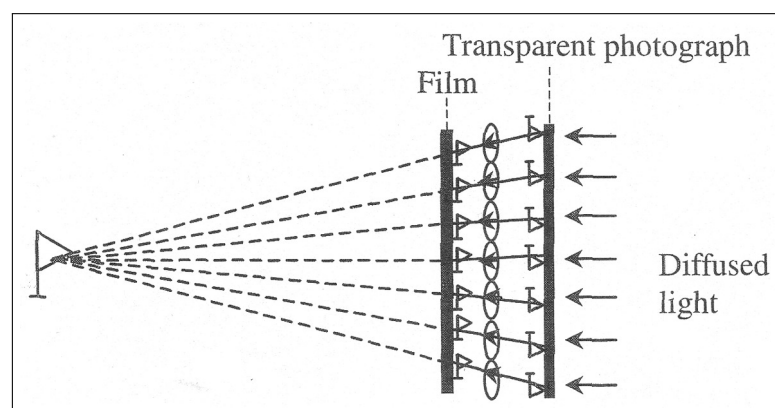
<sup>201</sup> Davis, 1991

<sup>202</sup> Okano 2002, S. 102

Abb. 26: Funktionsweise der Integral Fotografie<sup>202</sup>

#### 4.4.1 Pseudoskopische Bilder

Nach den Prinzipien der Integral Fotografie, die in Abbildung 26 gezeigt wurden, erscheint ein Gegenstand bei der Wiedergabe pseudoskopisch, d.h. die Tiefenverhältnisse sind invertiert. Das 3D-Bild, das hinter der Fotografie erscheinen sollte, erscheint nun vor der Fotografie und umgekehrt. Es wurden schon im Kapitel zur Geschichte der Integral Fotografie einige Versuche zur Lösung des Problems vorgestellt. Eine dieser Methoden war die von Herbert E. Ives 1931 vorgestellte und in Abbildung 27 gezeigte Methode der zweifachen Aufnahme.

Abb. 27: Methode nach Herbert E. Ives<sup>203</sup>

<sup>203</sup> Okano 2002, S. 103

Das Bild mit den umgekehrten Tiefenhinweisen wird einfach noch ein zweites Mal durch eine weitere Linseneinheit aufgenommen.<sup>204</sup> Die Tiefeninvertierung wird nun zweimal durchgeführt und das Bild des Endergebnisses erscheint mit den richtigen Tiefenverhältnissen. Hamasaki<sup>205</sup> hat eine Alternative zu diesem Ansatz vorgestellt und nannte es orthoskopische-pseudoskopische<sup>206</sup> Bildkonvertierungsoptik. Zur Umsetzung benutzte er eine Prismeneinheit.

Obwohl diese Methoden verschiedene Ansätze zur Lösung der Invertierung der Tiefeninformationen benutzen, bleiben die Eigenschaften der Einzelbilder die gleichen. Wie in Abbildung 28 gezeigt wird, müssen die Augen des Betrachters in Richtung der Lichtstrahlen schauen und der Film muss auf der gegenüberliegenden Seite der Linseneinheit positioniert sein.

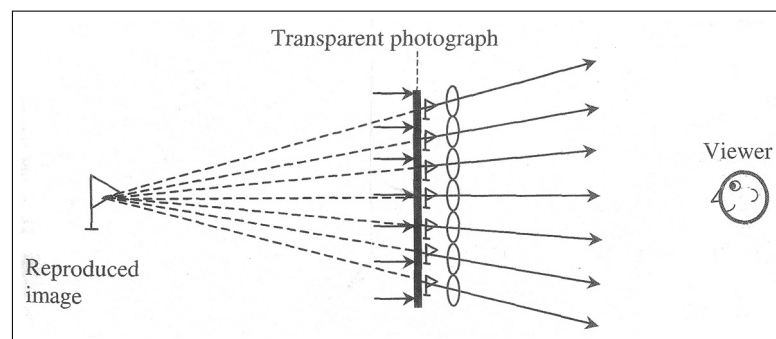


Abb. 28: Orthoskopisch reproduziertes Bild<sup>207</sup>

Zur Wahrung der richtigen Wiedergabe, muss jedes Einzelbild genauso ausgerichtet sein, wie es vor der Aufnahme des Objektes vor der Linseneinheit war. Durch die Benutzung herkömmlicher konvexer Linsen werden die Einzelbilder invertiert. Bei der Wiedergabe müssen die Einzelbilder so ausgerichtet sein (Abbildung 29), als seien sie um 180 Grad um ihren Mittelpunkt gedreht worden. Diese Umwandlung zu einem nicht-invertierten Bild kann auch mit anderen optischen und elektronischen Mitteln erzeugt werden.

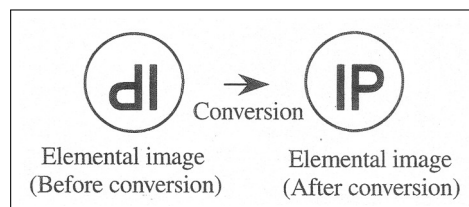


Abb. 29: Orthoskopisch-pseudoskopische Konvertierung<sup>208</sup>

<sup>204</sup> Ives 1931, S. 171

<sup>205</sup> Hamasaki 1988, S. 127 ff.

<sup>206</sup> Orthoskopisch bezeichnet die bei der Verwendung von Stereoskopen raumrichtige Wiedergabe, im Gegensatz zur pseudoskopischen, bei der nahe und ferne Objekte vertauscht erscheinen.

<sup>207</sup> Okano 2002, S. 103

<sup>208</sup> Okano 2002, S. 104

#### 4.4.2 Optische Überschneidungen einzelner Bildelemente (cross-talk)

Ein anderes Problem ist das optische Übersprechen zwischen den Einzelbildern. Abbildung 30 zeigt schematisch eine Vergrößerung der Linseneinheit. Die Lichtstrahlen von zwei verschiedenen Objekten (A, B) konvergieren, aufgrund des optischen Übersprechens, auf der gleichen Stelle Q. Doch während der Bildwiedergabe können sie nicht richtig getrennt werden. Daraus ergibt sich ein Doppelbild. Um klare Bilder ohne Doppel- oder Mehrfachbilder zu erhalten, ist es wichtig, dieses optische Übersprechen zwischen den Einzelbildern schon bei der Aufnahme zu verhindern. Dies gelingt nur, indem man optische Barrieren zwischen benachbarten Linsen montiert.<sup>209</sup>

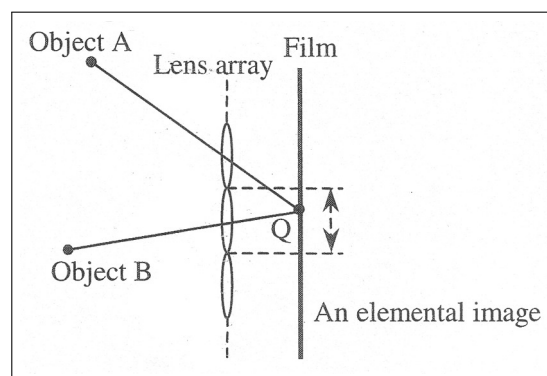


Abb. 30: Optisches Übersprechen (cross talk)<sup>210</sup>

Nachfolgend wird gezeigt, dass eine Gradienten-Index-Linse (GRIN)<sup>211</sup>, auch bekannt vom Lichtwellenleiter, zur Verhinderung von pseudoskopischen Bildern mit invertierten Tiefenhinweisen benutzt werden kann.<sup>212</sup> Die GRIN-Linse wurde erstmals 1964 von Marcuse und Miller vorgestellt.<sup>213</sup> Im Falle der paraxialen<sup>214</sup> Näherung sollte eine Gradientenlinse eine quadratische Abhängigkeit zum Index besitzen. Wenn der Abstand zwischen einem Objekt und der Ebene am Eingang der GRIN-Linse groß genug ist (siehe Abbildung 31), verläuft der optische Pfad periodisch, da sich der Index ständig entlang des Radius innerhalb der Linse verändert. Der optische Pfad und der Strahlengang innerhalb der GRIN-Linse sind somit periodisch. Des weiteren bietet die Linse auch ein schon invertiertes und ausgerichtetes Bild, abhängig von der Länge der GRIN-Linse.<sup>215</sup>

Wie bereits erwähnt, benötigt die Integrale Fotografie zur Verhinderung von pseudoskopi-

<sup>209</sup> Okano 2002, S. 103 f.

<sup>210</sup> ebenda, S. 104

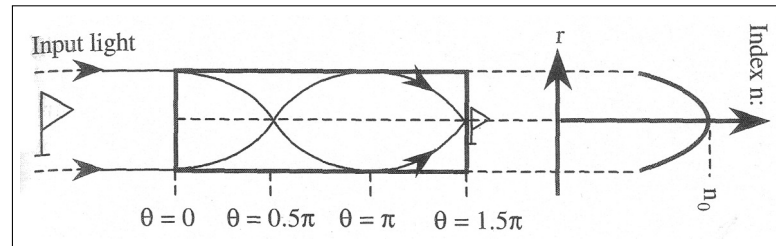
<sup>211</sup> In der Gradientenoptik befasst man sich mit optischen Effekten in Materialien, die einen kontinuierlichen Übergang (Steigung oder Gradient) zwischen verschiedenen Brechzahlen aufweisen. Bewegt sich Licht durch solche Materialien, so kommt es je nach Einfallrichtung zu einer bogenförmigen Ablenkung der Ausbreitungsrichtung.

<sup>212</sup> Aria 1998, S. 2034 ff.

<sup>213</sup> Marcuse 1964, S. 1759 ff.

<sup>214</sup> achsnahen

<sup>215</sup> Sakamoto 1973, S. 12 ff.

Abb. 31: Darstellung einer GRIN-Linse<sup>216</sup>

schen Bildern richtig ausgerichtete Einzelbilder. Deshalb wird die Aufnahmevorrichtung auf die Ausgabebene der GRIN-Linse gesetzt. Die Einzelbilder werden somit auf der Aufnahmevorrichtung ausgegeben. Die Bilder sind nun von einander abgesondert und das optische Übersprechen damit eliminiert. Mit dem Einsatz einer solchen GRIN-Linse zeigt sich, dass die beiden Probleme der invertierten Tiefe und das optische Übersprechen mit einmal gelöst sind.<sup>217</sup>

#### 4.4.3 Eingeschränkte Auflösung

Hoshino und Okano haben detaillierte Berichte hinsichtlich der Auflösung<sup>218</sup> von Bildschirmsystemen veröffentlicht.<sup>219</sup> Das Ergebnis ist, wird der Kontrast eines Objektes und der Kontrast der bildlichen Darstellung dieses Objektes miteinander verglichen, wird immer ein Kontrastverlust festgestellt. Die mathematische Beschreibung dieses Vergleiches wird auch mit **MTF** (Modulationstransferfunktion) angegeben. Die Ergebnisse können ebenfalls auch zur Bildaufnahme angewandt werden. Auf die Ergebnisse basierend, diskutiert dieses Kapitel die allgemeine Auflösung eines Bildschirmes und des Bildaufnahmesystemes.

Das optische Bild des Objektes, das durch die Linseneinheit auf dem Aufnahmegerät oder den Film aufgenommen wird, ist danach ein elementares Bild. Die Auflösung dieses Gesamtbildes ist abhängig von der Auflösung der Linsen und des Aufnahmegerätes und ergibt sich aus dessen Produkt. Ist das Aufnahmegerät auch noch mit einem optischen Tiefpassfilter ausgestattet wird ebenfalls die Auflösung des optischen Filters noch hinzugefügt. Im Wiedergabesystem wird das aufgenommene Einzelbild auf dem Schirm des Displays wiedergegeben. Lichtstrahlen von dieser Ebene wandern zurück durch die Linseneinheit um das Bild zu reproduzieren. Die Auflösung des Ausgabegerätes ist also wiederum abhängig vom Produkt der Auflösung des Wiedergabegerätes und der Linsen auf der Linseneinheit. Die Gesamtauflösung ist damit von der Auflösung

<sup>216</sup> Okano 2002, S. 105

<sup>217</sup> ebenda, S. 107

<sup>218</sup> Als Auflösung oder Auflösungsvermögen bezeichnet man in der Fotografie die Fähigkeit eines Objektivs, Films oder Sensors, bestimmte kleinste Strukturen noch wiedergeben zu können.

<sup>219</sup> Hoshino 1998, S. 2059 ff.

während der Aufnahme und der Wiedergabe beeinflusst und kann durch folgende Formel wiedergegeben werden:

$$\mathbf{MTF}(\alpha_s) = \mathbf{MTF}_{pl}(\alpha_s)\mathbf{MTF}_{pd}(\alpha_s)\mathbf{MTF}_{rl}(\alpha_s)\mathbf{MTF}_{rd}(\alpha_s)$$

Die Gesamtauflösung ist somit das Produkt von der Linseneinheit bei der Aufnahme, dem Aufnahmegerät, der Linseneinheit bei der Wiedergabe und des Wiedergabegerätes.

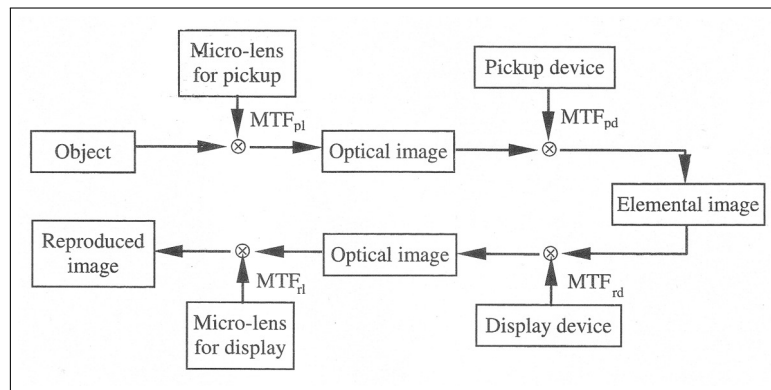


Abb. 32: Ablaufdiagramm bei der Aufnahme und Wiedergabe<sup>220</sup>

Besitzen die Geräte der Aufnahme und der Wiedergabe auch noch unterschiedliche Größen, erscheint das reproduzierte Bild und das Objekt auch noch in unterschiedlicher Größe und in verschiedener Position. Bei gleicher Größe erscheint das reproduzierte Bild an gleicher Stelle und in der gleichen Größe wie das reale Objekt. In der Praxis wird natürlich nicht nur ein Objekt aufgenommen, sondern gleich mehrere. Diese Objekte haben dann auch noch unterschiedliche Tiefenausrichtungen und es ist somit nicht mehr möglich, alle Objekte gleichzeitig zu fokussieren.

Wenn mit  $W_L$  die Weite der Linseneinheit, mit  $P_e$  der Abstand der Linseneinheit, mit  $N_m$  die Anzahl der Mikrolinsen und mit  $N_e$  die Anzahl der Pixel eines Einzelbildes und mit  $P_c$  der Pixelabstand der Aufnahmevorrichtung angegeben werden, dann erhalten wir die Weite der Linseneinheit, sowohl horizontal und vertikal:

$$W_L = N_m P_e = N_m N_e P_c$$

Aus dieser Gleichung erkennen wir, dass die Anzahl aller Pixel, die der Film benötigt, das Produkt von der Anzahl der Mikrolinsen und der Anzahl der Pixel jedes geschaffenen Einzelbildes ist. Die Anzahl der Mikrolinsen bestimmt somit das obere Limit der Auflösung. Die Auflösung sollte wiederum die gleiche Pixelanzahl wie das herkömmliche Fernsehen besitzen, damit es als vollwertiges TV-System gezählt werden kann. Die Anzahl der

<sup>220</sup> Okano 2002, S. 108



Pixel eines Einzelbildes wirkt sich ebenfalls auf die Auflösung des 3D-Bildes aus. Der Film benötigt  $N_e$  so viele Pixel, im Vergleich zum herkömmlichen Fernsehen, horizontal und vertikal, deshalb  $N_e^2$  im Ganzen. Das Gleiche gilt auch für die Anzahl der Pixel für das Wiedergabegerät. Damit benötigt man eine extrem hohe Auflösung sowohl für die Aufnahme als auch für die Wiedergabe.

Abbildung 33 zeigt die Auflösung der Linse, wenn zwei Objekte mit unterschiedlicher Tiefe aufgenommen werden ( $Z_s = -50$  und  $-150$ ). In beiden Fällen ist der Abstand zwischen der Linseneinheit und der Aufnahmeebene gleich der Brennweite der Mikrolinsen ( $g_p = f_p$ ). Dies hat zur Folge, dass der Fokus im Unendlichen liegt. Mit  $W_a$  wird der Durchmesser einer Linse der Linseneinheit angegeben. Die Auflösung wird in diesem Fall durch folgendes **MTF** ausgedrückt:

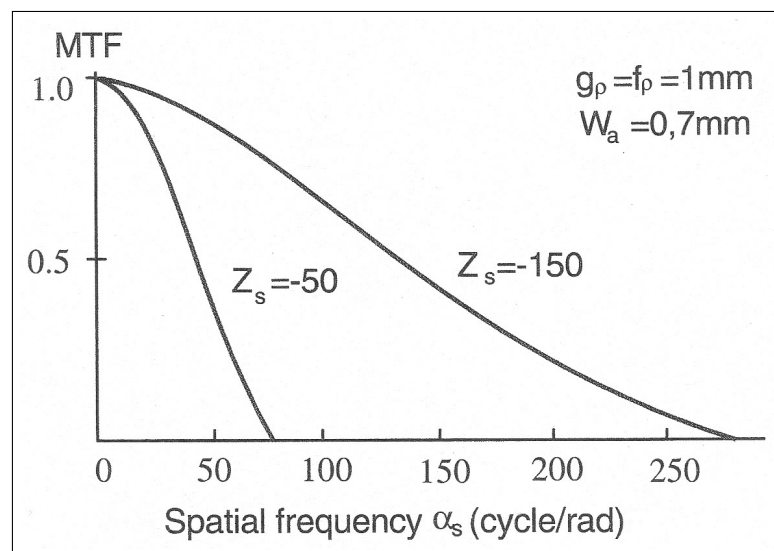
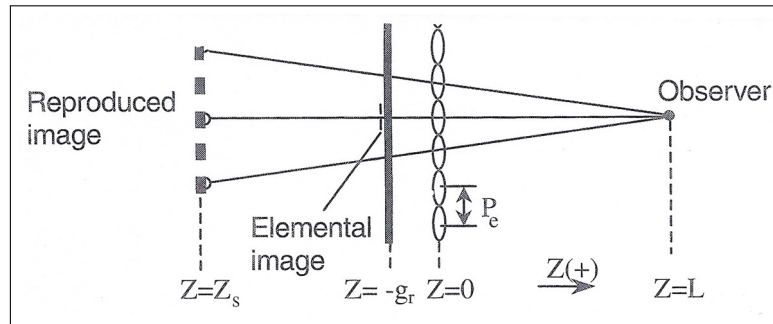


Abb. 33: Beispiel für die Auflösung eines reproduzierten Einzelbildes mit zwei Objekten in unterschiedlichen Tiefen.<sup>221</sup>

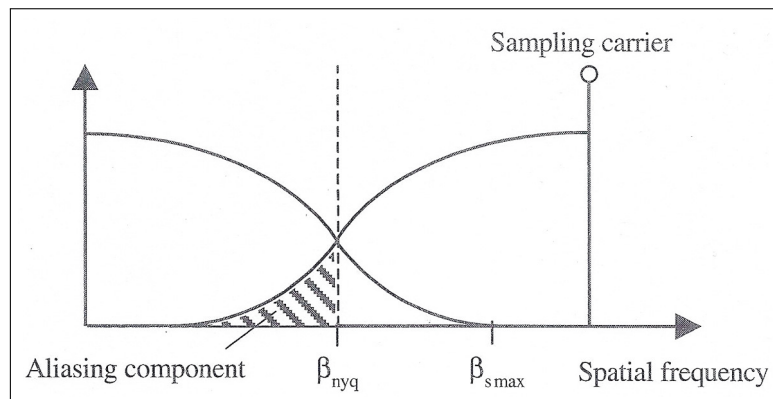
Je näher sich das Objekt also an der Linseneinheit befindet, umso kleiner die Auflösung. Die Auflösung eines Einzelbildes wird gemindert, aber die des rekonstruierten Bildes nicht, wie später noch genauer beschrieben wird. Durch das MTF-Diagramm ist erkennbar, dass sich das weiter weg befindende Objekt ( $Z_s = -150$ ) einen besseren Kontrast in der bildlichen Darstellung besitzt, als das näher liegende. Der Kurvenverlauf hat sich aufgrund diesen Kontrastverlustes stark verändert.

Wenn während der Wiedergabe die Linseneinheit verschoben wird, kann die Fokussierung verändert werden. Es ist somit möglich nahe oder ferne Objekte scharf abzubilden. Die Anpassung ist also unabhängig von der Aufnahme. Da es innerhalb des wiedergegebenen Bildes unterschiedliche Tiefen gibt, ist es aber nicht möglich alle auf einmal zu fokussieren.

<sup>221</sup> Okano 2002, S.109

Abb. 34: Beispiel für die Bildwiedergabe<sup>222</sup>

In Abbildung 34 wird gezeigt, dass nicht alle Lichtstrahlen, die von dem reproduzierten Bild ausgehen, vom Betrachter wahrgenommen werden. Er sieht nur die Lichtstrahlen, die den Weg durch die Linseneinheit direkt zu ihm finden und damit die Abtastrate<sup>223</sup> bestimmen. Sind die Frequenzen der Abtastrate höher als die Nyquist-Frequenz<sup>224</sup> entstehen nicht-lineare Verzerrungen, die auch als Alias-Effekt<sup>225</sup> bezeichnet werden. Diese lassen sich nicht wieder herausfiltern (siehe Abbildung 35).

Abb. 35: Aliasing-Effekt bei der Abtastung<sup>226</sup>

Die Grenzauflösung ist somit abhängig vom Abstand zwischen den Objekten und der Linseneinheit und von vielen anderen wichtigen Faktoren, wie zum Beispiel der Nyquist-Frequenz, der Anzahl der Pixel des Aufnahme- und des Wiedergabegerätes, der Fokussierung der Objekte und der Beugung des Lichtes innerhalb einer GRIN-Linse.

<sup>222</sup> Okano 2002, S. 107

<sup>223</sup> Abtastrate, auch Samplingrate oder Samplerate, ist in der Signalverarbeitung die Häufigkeit, mit der ein kontinuierliches Signal abgetastet und in ein zeitdiskretes Signal umgewandelt wird.

<sup>224</sup> Die Nyquist-Frequenz ist definiert als die halbe Abtastrate. Nach dem zugrunde liegenden Nyquist-Shannon-Abtasttheorem müssen alle Anteile in einem Signal kleinere Frequenzen als die Nyquist-Frequenz haben, damit das abgetastete Signal beliebig genau rekonstruiert werden kann.

<sup>225</sup> Als Alias-Effekte werden im Bereich der Signalanalyse Fehler bezeichnet, die durch Nichtbeachtung des Abtasttheorem (zu geringe Abtastfrequenz) beim digitalen Abtasten von Signal auftreten.

<sup>226</sup> Okano 2002, S. 112

Wenn die maximale Ortsfrequenz<sup>227</sup>  $\alpha_{s \max}$  des entferntesten Objektes kleiner ist als die Nyquist-Frequenz  $\beta_{nyq}$  kann die Grenzauflösung folgendermaßen dargestellt werden:

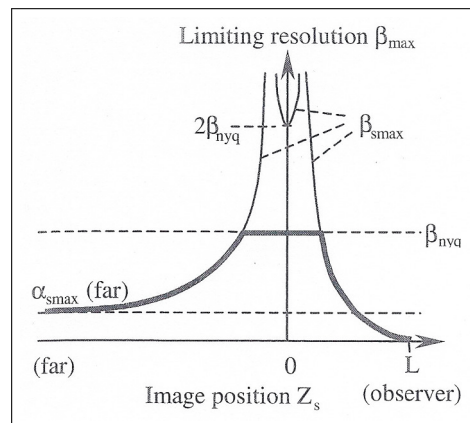


Abb. 36: Auflösungsverlust ( $\alpha_{s \max}(\text{far}) < \beta_{nyq}$ )<sup>228</sup>

Es zeigt sich, dass die maximale Ortsfrequenz der Wert der maximalen Ortsfrequenz des reproduzierten Bildes im negativen Unendlichen ist. Es ist somit möglich, Bilder ohne Auflösungsverlust zu reproduzieren, da die Nyquist-Frequenz geringer als die maximale Abtastfrequenz ist. Da sich aber die Grenzfrequenz des weit entfernten reproduzierten Bildes der maximalen Ortsfrequenz des weit entfernten Bildes nähert, kann es zu Auflösungsverlust kommen. Vor allem sinkt die Grenzfrequenz der Bilder, die in der Nähe des Betrachters erzeugt wurden, deutlich.

Wenn die maximale Ortsfrequenz  $\alpha_{s \max}$  des entferntesten Objektes größer gleich der Nyquist-Frequenz  $\beta_{nyq}$  ist, kann die Grenzauflösung folgendermaßen dargestellt werden:

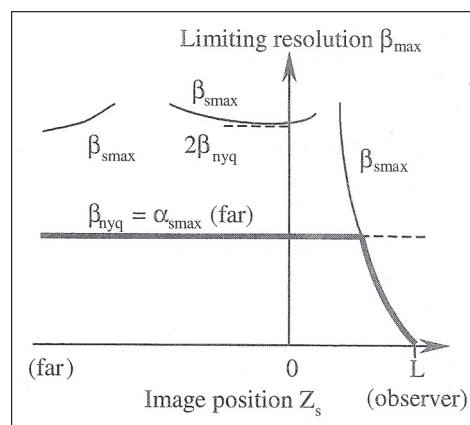


Abb. 37: Auflösungsverlust ( $\alpha_{s \max}(\text{far}) \geq \beta_{nyq}$ )<sup>229</sup>

<sup>227</sup> Unter der Ortsfrequenz versteht man den Kehrwert der räumlichen Periodenlänge. Die Periodenlänge ist der kleinste räumliche Abstand, nach dem sich bestimmte räumlich periodische Erscheinungen wiederholen.

<sup>228</sup> Okano 2002, S. 113

<sup>229</sup> Okano 2002, S. 113

Damit können Bilder, die sich weit entfernt von der Linseneinheit befinden, ohne Auflösungs-minderung abgebildet werden. Die Grenzauflösung der nahen Objekte ist immer noch begrenzt, aber deutlich besser als vorher. Daraus ergibt sich, dass Objekte, die sich weiter weg befinden mit einer maximalen Ortsfrequenz gleich der Nyquist-Frequenz abgetastet werden sollten.<sup>230</sup>

3D-Bilder, die sich weiter weg von der Linseneinheit befinden, haben, wenn  $\alpha_{s \max} < \beta_{nyq}$  gilt, eine niedrigere Auflösung, als die, die sich nah der Linseneinheit befinden. Dies wird vor allem dann deutlich, wenn die Anzahl der Pixel bei der Aufnahme und bei der Wiedergabe zu gering sind. Außerdem, wie schon in der Einleitung erwähnt, erscheinen orthoskopisch-reproduzierte Bilder, nachdem sie konvertiert wurden, nur noch hinter der Linseneinheit. In diesem Falle ist es nützlich die Tiefe der Objekte selbst zu kontrollieren, damit sie vor und hinter der Linseneinheit erscheinen. Eine Linse zur Tiefenkontrolle kann hier behilflich sein. Diese Linse ist eine konvexe Linse mit einer sehr hohen Blendenzahl. In Abbildung 38 wird eine Konstruktion gezeigt, damit die reproduzierten Bilder möglichst real erscheinen. Dies ist dem Verfahren der Holographie sehr ähnlich, wo ebenfalls das Objekt mit Hilfe konvexen Linsen um das Hologramm positioniert wird.<sup>231</sup>

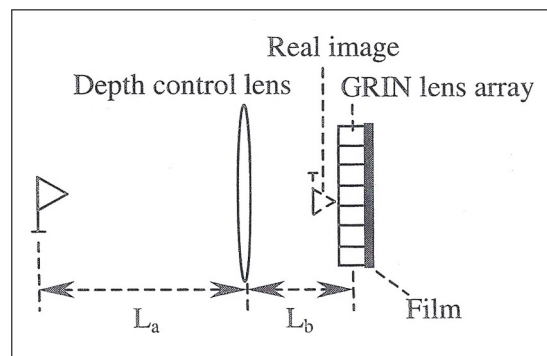


Abb. 38: Darstellung einer Linse zur Tiefenkontrolle<sup>232</sup>

#### 4.4.4 Aufnahme und Wiedergabe in Echtzeit

Die einfache Methode der Integralen Fotografie benutzt einen fotografischen Film, um Objekte festzuhalten.<sup>233</sup> Für die Aufnahme von bewegten Bildern in Echtzeit ist dies aber nicht geeignet und kann damit nicht im Fernsehbereich angewandt werden. Um aber auch bewegte Bilder in Echtzeit aufzunehmen, erscheint der Einsatz eines CCD-Sensors<sup>234</sup> anstelle eines Filmes sinnvoll. Für die Wiedergabe wird anstelle des transparenten

<sup>230</sup> Okano 2002, S. 112

<sup>231</sup> Stroke 1966, S. 325 ff. und Rosen 1966, S. 337 ff.

<sup>232</sup> Okano 2002, S. 116

<sup>233</sup> Vgl. Lippmann 1908, S. 821 ff.

<sup>234</sup> CCD-Sensoren (Charge-coupled Device) sind lichtempfindliche elektronische Bauteile, die auf dem inneren Photoeffekt beruhen.

Diafilmes ein LC-Display<sup>235</sup> hinter der Linseneinheit platziert. Die Videosignale werden direkt von dem Aufnahmegerät an das Wiedergabegerät übertragen.

Im Allgemeinen wird gesagt, dass die Größe der Linseneinheit bei der Aufnahme größer als der menschliche Augenabstand (ca. 65 mm) sein sollte um eine geeignete Parallaxe zu erhalten. Die Größe eines CCD-Sensoren ist aber nur ca. 10 Millimeter groß und damit um ein vielfaches kleiner als die Linseneinheit.<sup>236</sup>

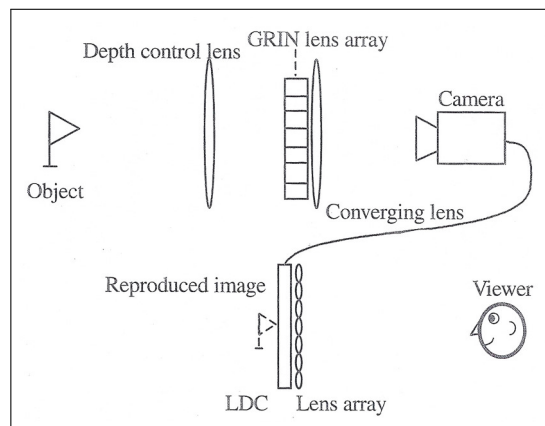


Abb. 39: Darstellung eines Experimentes mit Echtzeitaufnahme<sup>237</sup>

Abbildung 39 zeigt das Schema eines Experimentes mit Echtzeitaufnahme und -wiedergabe wie es von Okano, Hoshino, Arai, Yamada und Yuyama durchgeführt wurde.<sup>238</sup>

Zum Einsatz kommt hier eine Linse zur Tiefenkontrolle, eine GRIN-Linseneinheit, eine weitere Konvexlinse und eine HDTV-Kamera. Die zweite Konvexlinse muss benutzt werden, da es noch keine Linseneinheiten für konventionelle Kameras gibt. Die Kamera besitzt demzufolge ein eigenes Objektiv, das so eingestellt ist, dass es alle Bilder, die direkt hinter der Linseneinheit erscheinen, aufnimmt.

Das aufgenommene Videosignal wird direkt an das Ausgabegerät übertragen. Dieses Gerät besteht aus einem Farb-LC-Display und einer Einheit aus konvexen Mikrolinsen. Das Bild des LC-Displays ist invertiert, um richtig ausgerichtete 3D-Bilder zu erhalten. Da die Linse der Tiefenkontrolle das reale Bild seitenverkehrt erscheinen lässt, muss das Bild erneut invertiert werden. Die Brennweiten der Mikrolinsen sollten unbedingt die gleiche wie bei den GRIN-Linsen sein. Abbildung 40 zeigt eine Übersicht der aufgenommenen und wiedergegebenen Szene und eine vergrößerte Ansicht der Einzelbilder. Erkennbar ist, dass die Einzelbilder untereinander leicht unterschiedlich erscheinen. Die Anzahl der Einzelbilder beträgt horizontal 54 und vertikal 55 Stück. Diese Anzahl ist aber für

<sup>235</sup> Ein Flüssigkristallbildschirm (Liquid Crystal Display) ist ein Bildschirm oder eine Anzeige, dessen Funktion darauf beruht, dass Flüssigkristalle die Polarisationsrichtung von Licht beeinflussen, wenn ein bestimmtes Maß an elektrischer Spannung angelegt wird.

<sup>236</sup> Vgl. Bockaert

<sup>237</sup> Okano 2002, S. 118

<sup>238</sup> Okano 2002, S. 117 ff.

den Gebrauch als 3D-TV System zu gering. Der Betrachtungsbereich liegt bei circa  $20^\circ$ , sowohl horizontal und vertikal, was ebenfalls nicht ausreichend ist.

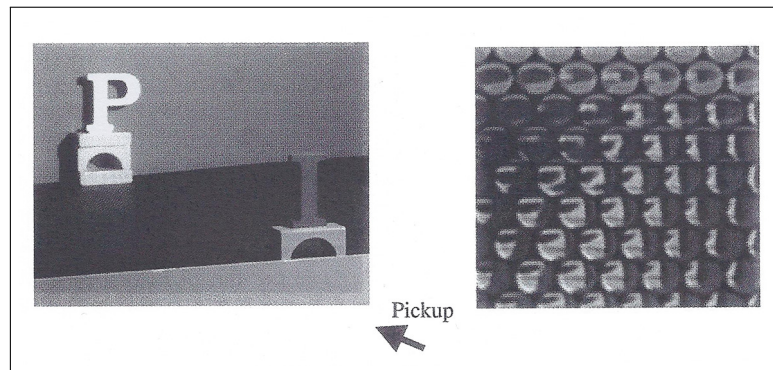


Abb. 40: Aufgenommene Szene und eine vergrößerte Ansicht der Einzelbilder<sup>239</sup>

Die Abbildung 41 stellt die reproduzierten Bilder aus Sicht von oben, unten, links und rechts dar. Der Versuch zeigt ganz klar, dass unterschiedliche Bilder aus jeweils anderen Betrachtungswinkel möglich sind.

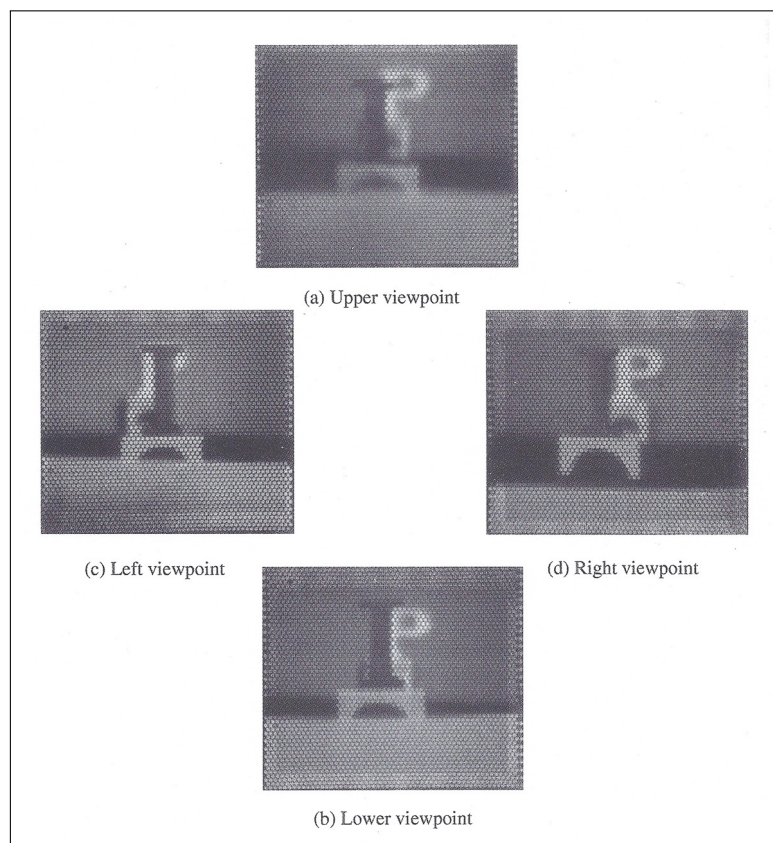


Abb. 41: Reproduzierte Bild aus verschiedenen Blickwinkeln<sup>240</sup>

Doppel- oder Mehrfachbilder wurden nicht beobachtet und dies deutet darauf hin, dass keine Interferenzen zwischen benachbarten Einzelbilder aufgetaucht sind. Das reprodu-

<sup>239</sup> Okano 2002, S. 120

<sup>240</sup> Okano 2002, S. 122

zierte Bild ist orthoskopisch richtig und nicht mehr pseudoskopisch. Des weiteren gibt es eine horizontale und vertikale Parallaxe in Echtzeit.

Okano schafft es also, mit der Durchführung seines Experimentes die anfangs erwähnten Probleme der Integral Fotografie zu widerlegen. Er erwähnt aber auch, dass die Resultate noch nicht zufriedenstellend sind und noch einiges an Optimierung benötigen.





## 5 Fazit

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit der Stereoskopie und insbesondere deren Methode der Integralen Fotografie. Die Integrale Methode schafft es, was alle derzeit verwendeten Projektionslösungen, die zur Betrachtung von 3D-Inhalten jeweils eine Spezialbrille benötigen, nicht schaffen; das Sehen von dreidimensionalen Filmen ohne den Gebrauch von Hilfsmitteln.

Damit ein Verständnis zur psychischen Entstehung von stereoskopischen Bildern möglich ist, wurde zunächst im Kapitel zwei auf die Grundlagen der menschlichen und optischen Wahrnehmung eingegangen. Hier zeigte sich, dass es gravierende Unterschiede in der Tiefenwahrnehmung gibt.

Viele Forschungsgruppen und Studienarbeiten beschäftigen sich aktuell mit der Übertragung und Wiedergabe von dreidimensionalen Bewegtbildern. Bei der Ausarbeitung des neuen Fernsehkonzeptes des HD-TVs wurden bereits die Möglichkeiten und Belange des 3D-Fernsehens berücksichtigt. Kapitel drei erörterte bestimmte Voraussetzungen und Bedingungen, welchen die Stereoskopie sowohl in der Aufnahme als auch in der Wiedergabe unterliegt. Es zeigt sich, dass alle derzeit verwendeten Projektionslösungen eine Brille zur Betrachtung und Wahrnehmung von 3D-Inhalten benötigen.

Mit der Integralen Fotografie wird im Kapitel vier eine Methode vorgestellt, die es schafft vollkommen auf den Gebrauch von Hilfsmitteln zur Betrachtung von dreidimensionalen Bildern zu verzichten. Leider gibt es gegenwärtig für die Ausführung der Integralen Fotografie vier grundlegende Probleme. In dieser Arbeit wurden alle vier Probleme genauestens erläutert und Lösungsansätze aufgezeigt bzw. vorgestellt. So wurde als benötigte Linseneinheit auf den Gebrauch von GRIN-Linsen hingewiesen. Mit deren Benutzung wurden gleich zwei Probleme, die Ausgangslage der Arbeit waren, mit einmal gelöst. Das Erscheinen von pseudoskopischen Bildern wurde ebenso beseitigt, wie das Erscheinen von sogenannten „Geisterbildern“. Durch den Einsatz einer Linse zur Tiefenkontrolle ist es möglich, weit entfernte Objekte, die eine schlechtere Auflösung besaßen, nah an die Linseneinheit heranzuholen. Dadurch konnte das Problem der unterschiedlichen Auflösungen behoben werden. Damit eine einfache Echtzeitaufnahme und -wiedergabe möglich ist, wurde der fotografische Film, den Lippmann in seiner Methode verwendete, durch einen CCD-Sensor getauscht. Ebenso wurde der transparente Diafilm bei der Ausgabe durch einen Farb-LC-Display ausgewechselt, um Bilder direkt und ohne aufwendige Entwicklung und Bearbeitung wiedergeben zu können. Die aufgenommenen Bilder wurden als Videosignal direkt vom Aufnahmegerät zum Wiedergabegerät übertragen. Die Ergebnisse lassen aber auch erkennen, dass die Anzahl der Einzelbilder und die Anzahl der Pixel eines Einzelbildes viel zu gering sind und unbedingt noch erhöht

werden müssen, damit auch hochwertige 3D-Bilder mit Spezifikationen des HD-TVs erzeugt werden können.

Das in Kapitel 4.4 erläuterte Experiment der Forschungsgruppe um Okano liefert ein vollfarbiges, autostereoskopisches 3D-Bild. Dieses Bild besitzt eine komplette vertikale und horizontale Parallaxe. Es können verdeckte Objekte sichtbar gemacht werden, in dem der Betrachtungswinkel leicht verändert wird. Es ist somit möglich einen gewissen Bereich hinter einem Gegenstand zu erblicken bzw. seitlich auf einen Gegenstand zu blicken. Ein Betrachter kann zudem auch zwischen Objekten im Vorder- und im Hintergrund fokussieren.

Da die Einzelbilder 3D-Informationen enthalten, kann dieses Verfahren auch in anderen Bereichen, wie zum Beispiel zur Umwandlung als Hologramm oder im 3D-Messbereich angewandt werden. 2010 veröffentlichte Adobe auf der GPU Technologie Conference einen Renderer<sup>241</sup>, der es erlaubt bei aufgenommenen Bildern mit einer plenoptischen<sup>242</sup> Linse, die stark der Linseneinheit der Integralen Fotografie ähnelt, unter anderem den Fokus und damit die Schärfe in verschiedenen Teilen und Ebenen des Bildes nachträglich und in Echtzeit zu verändern. In Kapitel 4.4.3 wurde ebenfalls bereits erwähnt, dass, wenn die Linseneinheit während der Wiedergabe verschoben wird, die Schärfe in verschiedenen Bereichen des reproduzierten Bildes geändert werden kann. Damit gelangt die Integrale Fotografie auch in Bereiche der Bildbearbeitung.<sup>243</sup>

Bei 3D-Filmen, die in Kinos abgespielt werden, wird sich die Stereoskopie eventuell gar nicht zu einem kulturellen und ökonomischen Standard entwickeln können. Die audiovisuelle Heimtechnologie wartet nur darauf, stereoskop erobert zu werden. Blue-Ray-Disc<sup>244</sup>, Fernsehen und vor allem das Computerspiel sind auf Dauer wirtschaftlich interessanter als das Kino. Es ist daher abzusehen, wie rasch auch dieses mal das Kino gegenüber den „Konkurrenten“ die Vorreiterrolle verliert. Vermutlich wird dies auch zu einer noch größeren Medienvernetzung führen.

Das Kino erlebte seit seinen Anfängen mindestens drei Wellen, die den Durchbruch der 3D-Technik im Kino verhießen. In den 20er-, den 50er- und den 80er-Jahren des vergangenen Jahrhunderts gab es kurze Phasen, in denen das Publikum für kurze Zeit dem Charme der plastischen Lichtbilder verfiel. Doch der Effekt verschwand schnell wieder im Nichts. Derzeit verheißt die vierte, aktuelle 3D-Welle, endlich alle Widerstände zu überwinden und zum Publikumsliebbling zu werden.

<sup>241</sup> Der Begriff Rendern bezeichnet die Erstellung einer Grafik aus einer Skizze oder einem Modell.

<sup>242</sup> Eine plenoptische Kamera verfügt über ein Gitter aus zehntausenden von Mikrolinsen vor dem Bildsensor. Durch das Linsengitter wird jeder Bildpunkt nochmals gebrochen und zu einem Kegel erweitert, der kreisförmig auf die Sensorfläche trifft.

<sup>243</sup> Fischer 2010

<sup>244</sup> Blue ray bedeutet wörtlich so viel wie blauer Strahl, was sich auf den violetten Lichtstrahl des verwendeten Lasers (405 nm) bezieht.

Spätestens seit in den 90er Jahren die ersten leistungsfähigen Desktop-PCs auf den Markt kamen, hat auch die Wissenschaft den Nutzen der 3D-Technik für sich entdeckt. Stereoskopische Verfahren sind heute aus der Medizin, der Astronomie oder der Fahrzeugtechnik kaum mehr wegzudenken.

Wurde die Geschichte der ersten Jahre des virtuellen, dreidimensionalen Raumes in Kinosälen geschrieben, kommen künftig wohl auch Labore und besonders die Wohnzimmer hinzu. Nur die Brille sollte bis dahin verschwunden sein.



## 6 Literaturverzeichnis

### Fachbücher

**van Albada, Lieuwe Evert Willem:** Wissenschaftliche Anwendung der Photographie, Teil 1 – Stereophotographie und Astrophotographie, Verlag von Julius Springer, Wien 1931

**Bahr, Achim:** Stereoskopie – Räume, Bilder, Raumbilder, Themenheft Nr. 49, Thales Verlag GmbH, Essen 1991

**Bordwell, David:** Narration in the Fiction Film, University of Wisconsin Press, Cambridge/Massachusetts 1985

**Börner, Reinhard:** Vom Linsenraster zur 3-D-Fernsehbildwiedergabe – Dreidimensional ohne Brille, Museum für Verkehr und Technik, Berlin 1989

**Gibson, James:** Wahrnehmung und Umwelt: Der ökologische Ansatz in der visuellen Wahrnehmung, Urban und Schwarzenberg, München 1982

**Hartwig, Thomas:** Das Stereoskop und seine Anwendungen, Aus Natur und Geisteswelt, Sammlung wissenschaftlicher – gemeinverständlicher Darstellungen, Verlag B. G. Teubner, Leipzig 1907

**Hayes, R. M.:** 3D-Movies. A history and Filmography of Stereoscopic Cinema, Mcfarland & Co Inc, Jefferson/North Carolina 1989

**von Helmholtz, Hermann:** Handbuch der physiologischen Optik, Verlag von Leopold Voss, 3. Band, 3. Auflage, Leipzig 1910

**Häßler, Ulrike:** 3D Imaging, Springer Verlag, Berlin 1997

**Iwanow, Simon P.:** Die dreidimensionale Farbfotografie, Aufbau-Verlag, Berlin 1954

**Kemner, Gerhard (Hrsg.):** Stereoskopie, Technik, Wissenschaft, Kunst und Hobby, Museum für Verkehr und Technik, Berlin 1989

**Kuhn, Gerhard:** Stereofotografie und Raumbildprojektion, Theorie und Praxis, Geräte und Materialien, vfv-Verlag, Gilching 1999

**Lüscher, Hermann:** Räumliches Sehen und die wichtigsten Grundbegriffe der Stereophotographie, Franke & Heidecke, Braunschweig 1928

**Lüscher, Hermann:** Stereophotographie. Einführung in die Grundlagen der Stereoskopie und Anleitung zur Erzielung einwandfreier Stereobilder, Union Deutsche Verlagsgesellschaft, Berlin 1931

**Mönks, Thomas:** 3D-Fotos – Sensationelle Bilder mit einfachsten Mitteln, Themenheft Nr. 53, Thales Verlag GmbH, Essen 1991

**Okano, Fumio (Hrsg.) / Bahram, Javidi (Hrsg.):** Three-dimensional Television, Video, and Display Technologies, Springer Verlag, Berlin 2002

**Pietsch, Werner:** Stereofotografie, VEB Fotokinoverlag, 2. überarbeitete Auflage, Halle 1962

**Rheden, Josef:** Die Stereoskopie: das Wesentliche über die Grundlagen der Herstellung und der Anwendung des Raumbildes, 3. gänzlich neu bearbeitete Auflage des Buches „Die Stereoskopie und das Stereoskop“ von F. Stolze, Verlag von Wilhelm Knapp, Halle (Saale) 1922

**von Rohr, Moritz (Hrsg.):** Abhandlungen zur Geschichte des Stereoskops, Verlag W. Engelmann, Leipzig 1908

**Schmidt-Ploch, Ulrich Clamor:** Die Lochkamera. Abbildungsoptimierung. Physikalische Hintergründe, Books on Demand, Norderstedt 2001

**Schröter, Jens:** 3D: Zur Geschichte, Theorie und Medienästhetik des technisch-transplanen Bildes, Verlag Fink, Paderborn 2009

**Selle, Walter:** „3D“ im Bücherspiegel, Zur Bibliographie der Stereoskopie 1939-1970 nebst Normentwürfen 1971, Deutsche Gesellschaft für Stereoskopie e.V., Berlin 1971

**Stolze, Franz:** Die Stereoskopie und das Stereoskop in Theorie und Praxis, Verlag von Wilhelm Knapp, 2. Auflage, Halle 1908

**Tropsch, Eduard Hans:** Die Praxis der Stereoskopie, Photokino-Verlag, Berlin 1931

**Valyus, Nikolai Adamovich:** Stereoscopy, Focal Press, 1966

**Vierling, Otto:** Die Stereoskopie in der Photographie und Kinematographie, Wissenschaftliche Verlagsgesellschaft mbH, Stuttgart 1965

**da Vinci, Leonardo:** Trattato Della Pittura (1804), Kessinger Pub Co, Whitefish 2009

**Waack, Fritz:** Stereofotografie, 2. erweiterte Auflage, Selbstverlag, Berlin 1979

**Winter, Gundolf / Schröter, Jens / Joanna Barck (Hrsg.):** Das Raumbild, Bilder jenseits ihrer Flächen, Wilhelm Fink Verlag, München 2009

**Zec, Peter:** Holographie: Geschichte, Technik, Kunst, DuMont Buchverlag, Köln 1987

## Hochschulschriften

**Hallmann, Gerlinde:** Digitale Stereofotografie, Diplomarbeit, Fachhochschule Düsseldorf, 2005

**Laufer, Maximilian:** Kino in der dritten Dimension. Kann das digitale Kino die Stereoskopie retten?, Bachelorarbeit, Hochschule Mittweida, 2008

**Krause, Lennart:** Der stereoskopische Film. Steht der Filmwelt ein großer Wandel bevor?, Bachelorarbeit, Hochschule Mittweida, 2009

**Röder, Oliver:** Grundlagen der Stereoskopie, Diplomarbeit, Fachhochschule Fulda, 2007

**Wiesner, Joachim:** Zur Stereoskopie bewegter Objekte, Dissertation, Göttingen 1946

## Zeitschriften

**Autor unbekannt:** Spiel mit den Dimensionen in: Page, 07/2010, S. 11

**Albertz, Stefan:** Stereoskopie – Grundlagen in: Digital Production, Ausgabe 03/2010, S. 107–110

**Arai, Jun / Okano, Fumio / Hoshino, Haruo / Yuyama, Ichiro:** Gradient-index lens-array method based on real-time integral photography for three-dimensional images in: Journal of Applied Optics Vol. 37, No. 11, 1998, S. 2034–2045

**Arfsten, Newton:** Das Raumbild: Zeitschrift für die gesamte Stereoskopie und ihre Grenzgebiete, 1935, S. 17–18, 35–37, 65–68, 89–90, 108–110, 131–134, 162–165, 190–192, 213–216, 238–240, 256–259

**Aulinger, Hermann:** Deutscher James Bond in 3D in: Digital Production, Ausgabe 06/2008, S. 44–48

**Böcker, Norbert:** Die nächste 3D-Generation in: Digital Production, Ausgabe 06/2008, S. 36–38

**Chutjian, A. / Collier, R. J.:** Recording and Reconstructing Three-Dimensional Images of Computer Generated Subjects by Lippmann Integral Photography in: Journal of Applied Optics Vol. 7, No. 1, Januar 1968

**Collier, R. J.:** Holography and Integral Photography in: Physics Today, Juli 1968

**De Montebello, Roger L.:** Wide-angle integral photography - The Integram System in: Proc. 1977 SPIE Annu. Tech. Conf. (San Diego, CA) Seminar 10, No. 120-08, Tech Digest S. 73–91, August 1977

**Dudnikov, Yu. A.:** Autostereoscopy and Integral Photography in: Journal of Optical Technology, Vol. 37, No. 7, Juli 1970

**Hamasaki, J. / Okado, M. / Utsunomiya, S.** Lens-plate 3D camera using orthoscopic-pseudoscopic-image-conversion optic in: Monthly Journal Industrial Science, University of Tokyo, Nr. 40, S. 127–136, 1988

**Hirsch, Jürgen:** Ganz großes Kino! Die neuen Generationen von Fernsehern, Camcordern und Fotoapparaten bringt die 3D-Technik in die eigenen vier Wände in: Berliner Zeitung, Nummer 197, 25. August 2010, S. D16

**Hoshino, H. / Okano, F. / Isons, H. / Yuyma, I.:** Analysis of resolution limitation of integral photography in: Journal of the Optical Society of America, No. 15, S. 2059–2065, 1998

**Ives, Herbert E.:** Optical Properties of a Lippmann Lenticulated Sheet in: Journal of the Optical Society of America, No. 21, S. 171–176, März 1931

**Janssen, Jan-Keno:** 3D 2.0 – Neuer Anlauf für Stereoskopie im Kino in: c't, Heft 16, 2008, S. 72–75

**Lange, Matthias J.:** Stereo-3D-Fieber in: Digital Production, Ausgabe 06/2008, S. 24–25

**Lippmann, Gabriel:** La Photographie Integral in: Comptes Rendus de l'Académie des Sciences, Vol. 146, 1908, S. 446 ff.

**Lippmann, Gabriel:** Epreuves Reversibles Donnant la Sensation du Relief in: Journal of Physical Chemistry, 4th series, Nov 1908, S. 821–825

**Lippmann, Gabriel:** J. Soc. Franc. Phys., Vol. 69, 1912

**Koshofer Gert:** Kodak und Kinofarbfilm in: Weltwunder der Kinematographie, 06/2002, S. 349–351



**Kost, Bernd:** Konstruktion von Zwischenansichten für Multi-Viewpoint-3DTV-Systeme in: Fernseh- und Kino-Technik, Nr. 02/1988, S. 67–72

**Lazarenko-Manevitsch, Wladimir:** Grundlagen der Stereoskopie in: Digital Production, Ausgabe 06/2008, S. 26–27

**Maier, Florian:** 3D-Grundlagen, Teil 1 in: Professional Production, 07+08/2008, S. 15–18

**Maier, Florian:** Technologien für das 3D-Kino in: Professional Production, 09/2008, S. 14–21

**Maier, Florian:** 3D-Aufnahme-Technologien in: Professional Production, 11/2008, S. 26–29

**Marcuse, D. / Miller, S. E.:** Analysis of a Tubular Gas Lens in: The Bell System Tech Journal, Nr. 43, S. 1759–1782, 1964

**Nadler, Ingo:** Digitale 3D-Technik für Echtzeit-Stereoskopie in: Stereo Journal, Heft 74, Ausgabe 04/2004, S. 24–28

**Risse, Dirk:** Atlas des Lebens – eine Reise in den Körper, Dreidimensionale Bilder sind in manchen medizinischen Disziplinen bereits Standard in: Berliner Zeitung, Nummer 197, 25. August 2010, S. D8

**Roberts, David E.:** The History of Integral Print Methods in: Lens Array Print Techniques

**Rosen, L.:** Focused-image Holography with extended Sources in: Applied Physics Letters, Volume 9, Issue 9, 1966, S. 337–340

**Schipper, Bernhard:** Die Welt ist keine Scheibe in: Digital Production, Ausgabe 06/2008, S. 50–51

**Seesslen, Georg:** Propheten einer neuen Bilderwelt, Die Entwicklung der 3D-Technik im Kino scheint unaufhaltsam – einher geht eine radikale Veränderung des Sehens und des Abbildens in: Berliner Zeitung, Nummer 197, 25. August 2010, S. D2

**Sokolov, A. P.:** Autostereoscopy and Integral Photography by Professor Lippmann's Method in: Izd. MGU, Moscow State University Press 1911

**Stroke, G. W.** White-Light Reconstruction of Holographic Images using Transmission Holograms recorded with conventionally-focused Images and ,in-line ' Background in: Physics Letters Volume 23, Issue 5, 1966, S. 325–327

**Yang, L. / Davis, N. / McCormick, M.:** Discussion of the Optics of a New 3-D Imaging System in: Applied Optics, Volume 27, No.21, November 1988

## Juristische Veröffentlichungen

Norm **DIN 4531**, Blatt 1, April 1956. Stereoskopie (Raumbildwesen). Begriffe.

Norm **DIN 4531**, Blatt 2, Oktober 1960. Stereoskopie (Raumbildwesen). Bildformate, Rahmenabstände, Bildanordnung, Kennzeichnung.

Norm **DIN 6170**, Blatt 1. Anaglyphenverfahren der Stereoskopie. Begriffe.

Norm **DIN 15543**, Januar 1961. Stereoskopisches Einfilmverfahren. Bildgrößen bei der Aufnahme.

Norm **DIN 19040**, Blatt 8, 1979. Makrobereich; Technische Spezifikationen für ein 3D-Bild.

## Patente

**Alofs, J.:** U.S. Patent 3.530.779, Three Dimensional Photography, 1970

**Anderton, John:** Pat. No. 542.321, Method by which pictures projected upon screens by magic lanterns are seen relief, July 7, 1891

**Bradshaw, Thomas I.:** U.S. Patent 4.714.656, Sheet Containing Contour-Dependent Directional Image and Method of Forming the Same, 1987

**Davis, Neil:** U.S. Patent 5.040.871, Pseudoscopic reversal method, 1991

**Florczak, Jeffrey M.** U.S. Patent 6.288.842, Sheeting with Composite Image that Floats, 2001

**de Montebello, Roger L.:** U.S. Patent 3.503.315, Integral Photography, 1970

**de Montebello, Roger L.:** U.S. Patent 3.584.369, Process of Making Reinforced Lenticular Sheet, 1971

**Orensteen, B:** U.S. Patent 4.708.920, Microlens Sheet Containing Directional Half-tone Images and Method for Making the Same, 1987

## Internetquellen

**Baumgärtner, Alexander:** Steigende Nachfrage nach 3D-Fernsehern, 5. August 2010  
<http://www.blogspan.net/7969-steigende-nachfrage-nach-3d-fernsehern.html>, 22.08.2010

**Bockaert, Vincent:** Sensor Sizes  
[http://www.dpreview.com/learn/?/Glossary/Camera\\_System/sensor\\_sizes\\_01.htm](http://www.dpreview.com/learn/?/Glossary/Camera_System/sensor_sizes_01.htm),  
27.10.2010

**Gubler, Joël:** Anatomy of an eye, 23. Dezember 2005  
[http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Eye\\_scheme\\_bw32.svg#file](http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Eye_scheme_bw32.svg#file), 19.08.2010

**Fischer, Martin:** GTC: Die Zukunft der Bildbearbeitung, 23. September 2010  
<http://www.heise.de/newsticker/meldung/GTC-Die-Zukunft-der-Bildbearbeitung-1094669.html>, 24.09.2010

**Keijzer, Richard:** Optisch vermaak in Nijmegen, 100 jaar geleden  
<http://www.noviomagus.nl/Gastredactie/Keijzer/Keijzer.htm>, 20.08.2010

**Klotz, Karlhorst:** 3D-TV nächstes Jahr?, 10.03.2006  
[http://www.digital-world.de/artikel/Online-Artikel/1252997/3d\\_tv\\_naechstes\\_jahr](http://www.digital-world.de/artikel/Online-Artikel/1252997/3d_tv_naechstes_jahr), 16.09.2010

**Matuschek, Jochen / Hefner, Alexander / Stephan, Sabrina:** Darstellungsmethoden  
<http://www.3d-shots.de/index.php?inc=darstellung>, 19.08.2010

**Nigel, Thomas:** Mental Imagery  
<http://plato.stanford.edu/entries/mental-imagery/notes.html>, 19.08.2010

**Wagner, Patrick:** Farbwahrnehmung  
<http://www.filmscanner.info/Farbwahrnehmung.html>, 05.07.2010



## Erklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und nur unter Verwendung der angegebenen Literatur und Hilfsmittel angefertigt habe.

Stellen, die wörtlich oder sinngemäß aus Quellen entnommen wurden, sind als solche kenntlich gemacht.

Diese Arbeit wurde in gleicher oder ähnlicher Form noch keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegt.

Mittweida, 22. November 2010